



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

## Determinación de aparatos de cimentación en edificios de mampostería antiguos mediante Georradar

Treball realitzat per:

**Raysa Febles Santana**

Dirigit per:

**Oriol Caselles**

Màster en:

**Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica**

Barcelona, **Septiembre 2016**

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

*Dedico este trabajo a mis padres,  
Rafael e Isabel, a ti también Israel.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mi tío Eddy, por todo su apoyo desde el día en que nací, por ayudarme en cada meta que me he propuesto por estar ahí en cada paso que he dado y por su confianza y amor incondicional. A todos los que de una manera u otra han ayudado a hacer realidad este sueño.

A mis padres: Isabel y Rafael, no tengo palabras para describir lo que siento por ustedes, simplemente ¡los amo! me faltarán años y fuerzas para terminar de agradecerles. Israel, mi hermano querido, mi gran amigo, no sé que sería mi vida sin ti, espero que nunca me faltes.

Agradezco profundamente a Jaime Clapés por la ayuda brindada desde el instante que me embarqué en este trabajo de tesis, sin él esto no sería posible. También a mi tutor Oriol Caselles por todos sus comentarios que me encaminaron a mejorar y dar fin a este viaje.

Estoy muy agradecida con el Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (MESCyT) que ha sido mi sustento económico durante estos años de estudios.

Agradezco a mis amigos y compañeros de máster: Mariana, Víctor, Dilson, Alex, Ivanna, Viviana, Alejandro, Manuel, Jean, Cintia, Rocío, Luis, Lumerli, Marcos, Gabriel y todos aquellos que de alguna u otra forma me han ayudado a completar esto, porque no he estado sola. ¡Muchas gracias!

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS .....</b>	<b>10</b>
1.1.    Introducción .....	11
1.2.    Objetivos .....	11
1.3.    Distrito del Eixample .....	12
1.4.    Estructura típica a explorar .....	16
1.4.1.    Nuevas edificaciones en el distrito.....	19
<b>CAPÍTULO 2. TEORÍA GENERAL SOBRE GEORRADAR .....</b>	<b>21</b>
2.1.    Introducción y antecedentes.....	22
2.2.    Funcionamiento básico del georradar .....	23
2.3.    Aplicaciones del GPR .....	26
2.4.    Antenas en dispositivos GPR.....	27
2.4.1.    Parámetros de una Antena.....	29
2.4.2.    Característica de las antenas para su uso en exploración de cimentaciones .....	33
2.5.    Procesamiento de datos GPR .....	35
<b>CAPÍTULO 3. CASOS DE ESTUDIO.....</b>	<b>37</b>
3.1.    Introducción .....	38
3.2.    Edificio Calle Nápoles, Barcelona .....	39
3.3.    Edificio en Calle Aragón, Barcelona. ....	41
3.4.    Escuela Bon Soleil de Gavá, Barcelona.....	44
3.5.    Edificio en Calle Tafalla, Pamplona .....	47
3.6.    Edificio en Gran Vía de les Corts Catalanes, Barcelona.....	51
3.7.    Edificio en Calle Marina, Barcelona.....	55
<b>CAPÍTULO 4. MODELO A ESCALA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
4.1.    Modelo a escala.....	59
4.2.    Análisis de resultados .....	65
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>73</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Delimitación geográfica del Distrito del Eixample de Barcelona y ubicación con respecto al municipio de Barcelona. ....	12
<b>Figura 1.2.</b> Distribución del espacio y parámetros básicos de las vías y las intervías del “Ensanche Cerdà” (Serratosa, 2009).....	13
<b>Figura 1.3.</b> a) Luz solar a lo largo del día sobre la manzana. b) Altura de los edificios y penetración del sol a 45° (Moliner Vázquez, 2010).....	14
<b>Figura 1.4.</b> Modelo de unidad vías e intervías propuesto por Idelfonso Cerdá (Magrinyà Torner, 2009). ....	15
<b>Figura 1.5.</b> Formas básicas de las manzanas de acuerdo con el plan original de Cerdá (Moliner Vázquez, 2010). ....	15
<b>Figura 1.6.</b> Porcentajes de edificios según su estructura y forjado para el distrito del Eixample (Lantada Zarzosa, 2007). ....	16
<b>Figura 1.7.</b> Edificios de esquina o chaflán, ubicados en la intersección de las calles Villarroel y París en el Eixample Izquierdo. ....	17
<b>Figura 1.8.</b> Edificio típico en medio de la manzana. Este se encuentra ubicado en la calle de Villarroel en el Eixample Izquierdo.....	18
<b>Figura 1.9.</b> Grúa utilizada para el montaje de áticos en la zona del Eixample (Vendrell Felici, 2015). ....	20
<b>Figura 1.10.</b> Montaje de una obra nueva (ático) por la empresa La casa por el tejado (Vendrell Felici, 2015). ....	20
<b>Figura 2.1.</b> (a) Esquema básico del funcionamiento de un radar, modificada de González & Marcello (2002). (b) Funcionamiento básico de un georradar (Worksmart, Inc., 2012).....	24
<b>Figura 2.2.</b> Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de GPR y el registro del resultado o radagrama. (Pérez Gracia, 2001).....	24
<b>Figura 2.3.</b> Reflexiones en diversos puntos del subsuelo, el principio es aplicable a la exploración de cualquier estructura desde una de sus caras libres. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). ....	25
<b>Figura 2.4.</b> Profundidad de alcance y aplicación dependiendo de la frecuencia de la antena. (Persico, 2014). ....	28

<b>Figura 2.5.</b> Ejemplo de un diagrama de radiación polar donde se pueden observar los lóbulos principal y secundario (Monachesi, Frenzel, Chaile, Carrasco, & Gómez López, 2011). .....	30
<b>Figura 2.6.</b> Representación tridimensional de un diagrama de radiación en los planos H y E (Cardama Aznar, y otros, 1998).....	31
<b>Figura 2.7.</b> Diagramas de radiación representados en coordenadas polares (izquierda) y coordenadas cartesianas (derecha) (Cardama Aznar, y otros, 1998). .....	32
<b>Figura 2.8.</b> Esquema de un modelo de radiación de una antena donde se destacan los lóbulos principal y secundario así como la semianchura del lóbulo (Pérez Gracia, 2001). .....	33
<b>Figura 2.9.</b> Cambios en los patrones de radiación al variar la constante dieléctrica. a) Constante dieléctrica $\epsilon_r=5$ . b) Constante dieléctrica $\epsilon_r= 20$ (Warren & Giannopoulos, 2016). .....	34
<b>Figura 2.10.</b> Diferencia de la distancia horizontal que puede ser captada por la antena teniendo la misma profundidad y distinto ángulo de radiación. ....	35
<b>Figura 3.1.</b> Ubicación geográfica de los edificios estudiados de la comunidad autónoma de Cataluña utilizados como casos de estudio. ....	38
<b>Figura 3.2.</b> Interior del edificio en la calle Nápoles.....	39
<b>Figura 3.3.</b> Plano de la planta baja del edificio ubicado en la Calle Nápoles. Las flechas indican la dirección de los perfiles y las anotaciones en color rojo, las detecciones de cada perfil (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).....	40
<b>Figura 3.4.</b> Radagrama del Perfil 4 muestra el área de estudio longitudinalmente (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016). ....	40
<b>Figura 3.5.</b> Radagrama del Perfil 8, muestra una sección transversal del área de estudio. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).....	41
<b>Figura 3.6.</b> Plano de la planta baja del edificio ubicado en la calle Aragón. El plano incluye la dirección de los perfiles y los resultados más importantes de estas exploraciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). ....	42
<b>Figura 3.7.</b> Radagrama del Perfil 7 del edificio ubicado en la calle Aragón y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). ....	43
<b>Figura 3.8.</b> Radagramas de los Perfiles 14 y 15 y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). ....	43
<b>Figura 3.9.</b> Radagrama del Perfil 2 y posibles detecciones del edificio ubicado en la calle Aragón. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).....	44

<b>Figura 3.10.</b> Planta baja del edificio 1 de la Escuela Bon Soleil de Gavá, se muestra la dirección de los 20 perfiles realizados y las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	45
<b>Figura 3.11.</b> Planta baja del edificio 2 de la Escuela Bon Soleil de Gavá. Se muestra la dirección de los 6 perfiles realizados y las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).....	45
<b>Figura 3.12.</b> Radagrama del Perfil 17 correspondiente al Edificio 1 de la Escuela Bon Soleil de Gavá (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	46
<b>Figura 3.13.</b> Radagrama del Perfil 19 perteneciente al Edificio 1 de la Escuela Bon Soleil de Gavá (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	46
<b>Figura 3.14.</b> Radagrama del Perfil 26 realizado en el Edificio 2 de la Escuela Bon Soleil de Gavá (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	47
<b>Figura 3.15.</b> Edificio en la calle Tafalla en la ciudad de Pamplona. a) y b) muestran el estado del sótano donde se realizaron las prospecciones. c) imagen de la fachada del edificio (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014) y d) ubicación geográfica de la manzana donde se encuentra el edificio (Google Maps, 2016).....	47
<b>Figura 3.16.</b> Radagrama correspondiente al Perfil 10 del edificio ubicado en la calle Tafalla, Pamplona (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014).....	48
<b>Figura 3.17.</b> Planta de sótano del edificio ubicado en la calle Tafalla (Pamplona). En la planta muestran los perfiles con la dirección y las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014). .....	49
<b>Figura 3.18.</b> Radagrama correspondiente al Perfil 20 del edificio ubicado en la calle Tafalla, Pamplona (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014).....	50
<b>Figura 3.19.</b> Estado de las dependencias del edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes en el momento de la exploración (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016). .....	51
<b>Figura 3.20.</b> Plano de la Planta Baja del edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes, Barcelona. Contiene la dirección y detección de los 20 perfiles que se realizaron en esta planta (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).....	52
<b>Figura 3.21.</b> Plano del sótano del edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes con el único perfil realizado y las detecciones del mismo (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016). .....	52

<b>Figura 3.22.</b> Radagrama que corresponde al Perfil 21 con las notas de las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).....	53
<b>Figura 3.23.</b> Radagrama del Perfil 11 ubicado en la Planta Baja del edificio y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).....	54
<b>Figura 3.24.</b> Radagrama obtenido del Perfil 2 ubicado en la Planta Baja y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).....	54
<b>Figura 3.25.</b> Planta baja del edificio ubicado en la calle Marina, Barcelona. Sobre el plano se observan los 16 perfiles realizados con su dirección y detecciones. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	55
<b>Figura 3.26.</b> Radagrama del Perfil 1 donde se muestran las detecciones encontradas (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	56
<b>Figura 3.27.</b> Radagrama correspondiente al Perfil 4 y las detecciones de esta prospección (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).....	56
<b>Figura 3.28.</b> Radagrama correspondiente al Perfil 12 con 22 metros de longitud muestra las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).....	57
<b>Figura 3.29.</b> Radagrama correspondiente al Perfil 5, de más de 30 metros de longitud (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015). .....	57
<b>Figura 4.1.</b> Curva granulométrica del de la arcilla roja del llano de Barcelona (Hernández Arciniega, 2014). .....	60
<b>Figura 4.2.</b> Contenedor del modelo a escala con sus dimensiones. ....	60
<b>Figura 4.3.</b> Representación gráfica del modelo a escala con la distribución de las capas y ubicación de los ladrillos. El dibujo es esquemático y no se encuentra a escala. ....	61
<b>Figura 4.4.</b> (a) Sistema digital de georradar de registro continuo SIR-3000 de GSSI (b) Antena de 2000 MHz de frecuencia. ....	62
<b>Figura 4.5.</b> Perfil 1, en esta prospección se simula el encuentro frontal con un muro de fachada. El dibujo es un modelo esquemático y no se encuentra a escala. ....	64
<b>Figura 4.6.</b> Perfil 2. En esta prospección se analizan dos casos: atravesar un dintel y el encuentro con la cimentación de un muro interior.....	64
<b>Figura 4.7.</b> Parte de los planos donde aparecen los casos de detección de riostras. ....	65
<b>Figura 4.8.</b> Radagrama que corresponde con el Perfil 2 del modelo a escala y situación espacial de la detección mostrada. ....	66

<b>Figura 4.9.</b> Esta figura se corresponde con la Figura 4.7 para cada perfil señalado en la figura anterior se muestra el radagrama correspondiente. ....	66
<b>Figura 4.10.</b> Porciones de los planos de edificios donde se han detectado medianeras. ....	67
<b>Figura 4.11.</b> Radagramas que se corresponden con los planos de la Figura 4.4. Se muestran las detecciones de medianeras en los casos donde existen. ....	68
<b>Figura 4.12.</b> Radagrama del Perfil 1 del modelo a escala (abajo). También se muestra la trayectoria del perfil y el lugar de la simulación de la zapata medianera (arriba). ....	69

## RESUMEN

En la actualidad, Barcelona como municipio tiene problemas de habitabilidad porque existe una densidad de población muy alta y casi ningún espacio que se pueda aprovechar para construir. Por estas razones las opciones se reducen a aprovechar el “espacio de vuelo” de las fincas, es decir, aumentar niveles. El distrito por excelencia para este fin es el Distrito del Eixample, un distrito con una historia interesante que en su momento dio nueva vida al municipio de Barcelona, la mayoría de los edificios del mencionado distrito (más del 60% de los edificios) son de mampostería cimentados superficialmente sobre zapatas corridas o bien zapatas aisladas bajo pilares.

Estos edificios son antiguos (antigüedad media de 84 años) de los que no se conservan planos y generan dudas a la hora de plantearse un recercado o intervención sobre estos porque no se conoce la cimentación y por tanto la distribución de carga hacia la misma. Por esta razón en la tesis se plantea como objetivo general *determinar los aparatos de cimentación en edificios antiguos de mampostería utilizando georradar*.

La técnica de prospección con georradar aporta muchas ventajas para resolver el tipo de problema que plantean estos edificios: es un método no destructivo y no invasivo (el edificio puede encontrarse ocupado al momento de realizar el estudio y no afecta la integridad estructural y/o arquitectónica); aporta información adicional sobre el subsuelo: presencia de humedades, presencia de estructuras subterráneas, oquedades, tuberías de servicios, cambios en la tipología constructiva, etc.; y es un estudio donde se tienen resultados de forma rápida. Una de las desventajas que plantea este método es que existe un grado de incertidumbre a la hora de interpretar los resultados. Por este motivo en este trabajo se comparan los resultados obtenidos en estudios de campo realizados y un modelo a escala de una cimentación utilizando mampuestos de forma que se puedan calibrar los resultados. Durante el desarrollo de la tesina se propone encontrar los siguientes objetivos específicos:

- 1) Realizar un modelo a escala de una cimentación de edificio utilizando bloques de fábrica para calibrar los resultados obtenidos en informes de casos reales.
- 2) Comparar los resultados obtenidos en estudios de campo con los que se obtienen del modelo a escala.
- 3) Aprovechar la característica del ángulo de radiación de la antena de georradar para detectar la cimentación de muros separados del centro de la antena.

Durante el proceso de comparación de los casos reales con los casos de estudio, se encontró la dificultad de tener mucha variación entre un caso real y otro, con distintos elementos de cimentación, distintas profundidades o la presencia de perturbaciones en la geología que hace difícil de apreciar las prospecciones. A pesar de esto se escogieron los casos comunes y más representativos y se procedió a compararlos con los casos de estudio. Los resultados obtenidos validan el método de prospección con georradar para detectar cimentaciones en edificios de mampostería.

# CAPÍTULO 1. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

---

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El Municipio de Barcelona tiene en su mayoría edificaciones antiguas, está fuertemente poblado (1 604 555 habitantes al 2015 según el Instituto Nacional de Estadística para una densidad de población de 15 687 habitantes/km<sup>2</sup>) y casi todas las parcelas se encuentran edificadas, de modo que las nuevas edificaciones se suelen construir encima de los edificios ya existentes. Esto presenta un problema al querer agregar más niveles a la estructura porque en muchos casos *no hay información sobre las dimensiones de la cimentación existente* y por tanto no se sabe la capacidad portante de la misma si se quiere agregar más carga y al mismo tiempo cumplir con los factores de seguridad exigidos (FS=3 para el Municipio de Barcelona) esto hace que se requieran exploraciones que permitan conocer los cimientos del edificio.

El método del *georradar* es una opción aceptable para resolver este tipo de problemática porque al ser un *método no destructivo* se llevan a cabo los análisis que permiten conocer las dimensiones de la cimentación sin interferir con la habitabilidad de la edificación o la integridad estructural y arquitectónica. Esto se hace posible utilizando una *característica del ángulo de radiación de la antena*.

El estudio estará limitado, aunque no exclusivamente al Distrito 2 de Barcelona y zonas cercanas, el distrito del Eixample (Figura 1.1) se ha escogido por ser un centro económico y cultural de la ciudad y además, resulta ser representativo del problema planteado. La creciente demanda de obras nuevas ha creado el siguiente escenario: en el distrito del Eixample el año medio de construcción de los edificios es el 1931 (antigüedad de 84 años al 2015), el 64.5% de los edificios son de mampostería, es eminentemente residencial y de actividades terciarias, tanto de comercio como administrativa, y además el 98.6% de las parcelas del distrito se encuentran edificadas (Lantada Zarzosa, 2007).

Otras zonas que se exploran en el estudio de casos reales, aparte del municipio de Barcelona son: el municipio de Gavá en el sur de la comarca del Bajo Llobregat y en la ciudad de Pamplona un edificio en la calle Tafalla.

## 1.2. OBJETIVOS

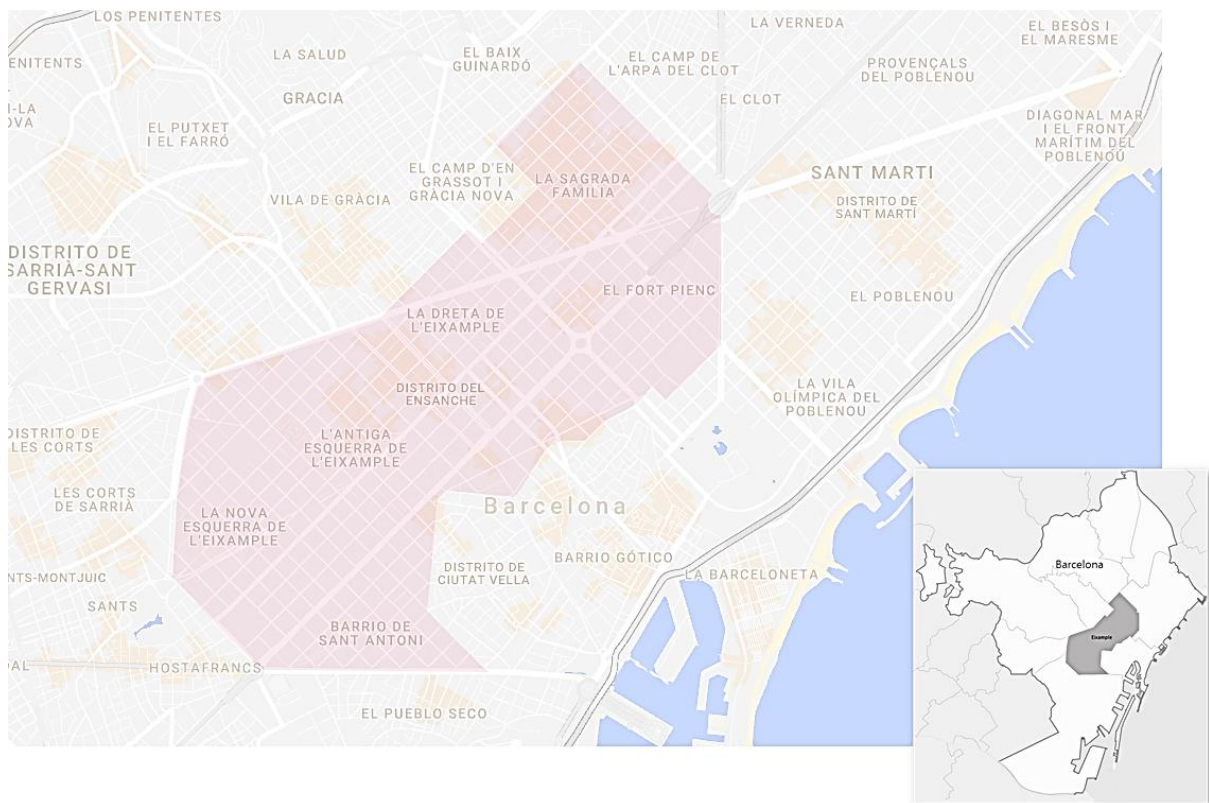
Teniendo en cuenta el ritmo de crecimiento de los centros urbanos y el poco espacio para erigir nuevas edificaciones se pone de manifiesto la necesidad de recrecer los edificios existentes con la dificultad de que muchos de ellos son tan antiguos que carecen de planos estructurales y existen dudas en torno a la repartición de cargas hacia la cimentación. Por tanto, el objetivo general de esta tesina es *determinar los aparatos de cimentación en edificios antiguos de mampostería utilizando georradar*. Para lograr el objetivo planteado se aprovecha una característica poco usada de las antenas de georradar: ángulo de radiación más amplio.



Los objetivos específicos que se proponen son los siguientes:

1. Realizar un modelo a escala de una cimentación de edificio utilizando bloques de fábrica para calibrar los resultados obtenidos en informes de casos reales.
2. Comparar los resultados obtenidos en estudios de campo con los que se obtienen del modelo a escala.
3. Aprovechar la característica del ángulo de radiación de la antena de georradar para detectar la cimentación de muros separados del centro de la antena.

### 1.3. DISTRITO DEL EIXAMPLE



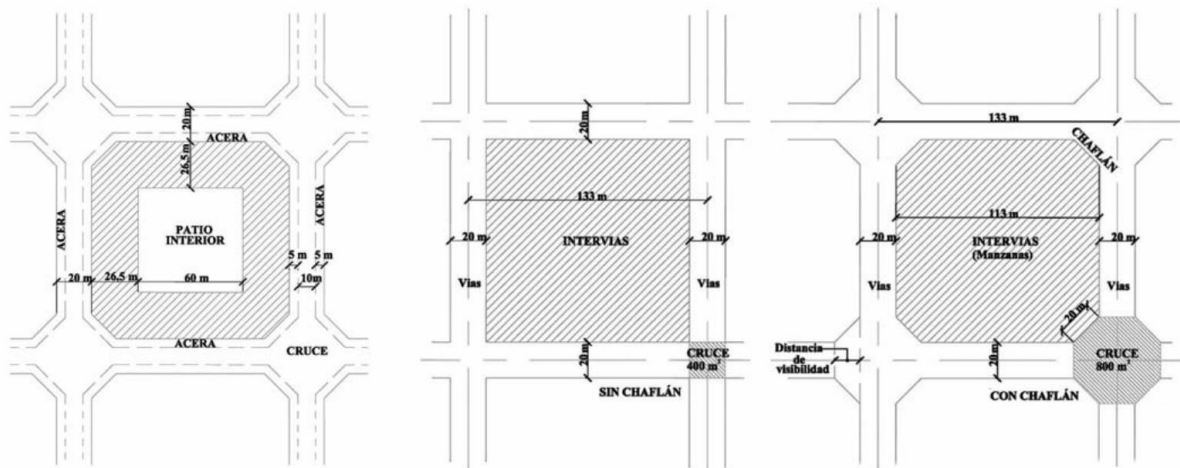
**Figura 1.1.** Delimitación geográfica del Distrito del Eixample de Barcelona y ubicación con respecto al municipio de Barcelona.

Para entender la organización, forma de crecimiento y relevancia de este distrito se debe abarcar un poco sobre su historia y evolución. El Eixample (en catalán, en castellano “Ensanche”) es el distrito número 2 del Municipio de Barcelona, fue ideado por el arquitecto Idelfonso Cerdà a mediados del siglo XIX. Idelfonso Cerdà nació en el año 1815 en Centelles, comarca de Osona, a unos 50 km al norte de Barcelona. Amplió los estudios iniciales de letras, que había realizado en Vic, con los estudios de matemáticas y arquitectura en Barcelona, y se

marchó a Madrid en 1835 para convertirse en ingeniero de caminos el año 1841 (Montaner, 1987).

Durante su vida realizó dos trabajos que sirvieron de base para el proyecto del Ensanche de Barcelona: En el año 1850, el *Plano topográfico de Barcelona y sus alrededores* y, en 1856, la *Monografía estadística de la clase obrera de Barcelona* (Montaner, 1987). El evento catalizador del proyecto del Ensanche fue el derribo de las murallas de Barcelona el 24 de agosto de 1854, cuando el gobierno autorizó el derribo de los muros que aprisionaban la ciudad y había movilizado a los barceloneses al grito de *Abajo las murallas*. Uno de los argumentos más destacados fue dado por Pere Felip Monlau, médico, periodista y miembro del Partido Progresista que en el 1841 ganó el concurso del Ayuntamiento a la mejor memoria que expusiera los beneficios de demoler las murallas (Tobarra, 2004).

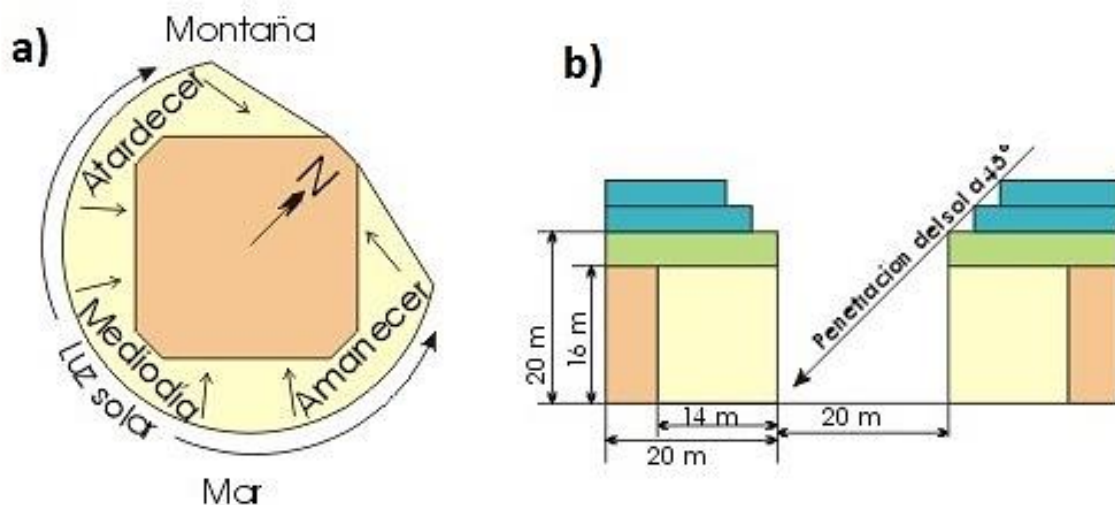
Una vez abierto el camino hacia la nueva ciudad Cerdà se lanza de inmediato a redactar el Proyecto de Reforma y Ensanche, basándose en la información obtenida con el Plano Topográfico y la Monografía Estadística, en su proyecto introdujo la idea de edificios en altura, y, para sacar mejor provecho a la escalera de acceso desde la fachada, propone dos viviendas por rellano, cada una de las cuales tendrá una anchura de 7 metros, es decir, 14 metros de fachada por edificio. La exigencia de asoleo y ventilación aconseja una profundidad del edificio de 26,5 metros, mientras que su altura no conviene que sobrepase la anchura de la calle, en la Figura 1.2 se puede ver como se asigna 20 metros al ancho de calle, de los cuales 10 se reservan para carruajes y otros 10 metros (5 de cada lado) para los peatones (Serratosa, 2009).



**Figura 1.2.** Distribución del espacio y parámetros básicos de las vías y las intervías del "Ensanche Cerdà" (Serratosa, 2009).

Los vértices de cada manzana coinciden con los puntos cardinales y gracias a ello todos sus lados tienen luz directa del sol a lo largo del día (Figura 1.3a). Con la altura de los edificios a 20 metros y estando el sol a 45° iluminaría cualquier edificio en su totalidad sin que ningún edificio vecino le hiciera sombra. También se pensó que se podían añadir más pisos al edificio si la altura de éstos era igual a la anchura de entrada respecto a la fachada, ya que de esta manera se mantendría la iluminación (Figura 1.3b) (Moliner Vázquez, 2010).

Según Nóvoa (2009), en la primera propuesta realizada por Cerdà este asigna “manzanas” (islas) de 113 metros de lado, con un patio interior de 60 metros y una edificabilidad de 43 metros (2 veces la profundidad edificable de 26,5 m). De eje a eje de calle resulta un rectángulo de 133 m ( $113 + [2 \times 10]$ ). Como elemento nuevo introduce la figura del chaflán en el cruce de calles con el objetivo de compensar el desgaste del doble flujo de tráfico en el encuentro de dos vías de 20 metros ( $400 \text{ m}^2$ ). El chaflán aporta una innovación que con el tiempo ha sido incorporada a la red de carreteras: *la distancia de visibilidad*, que permitía a las “locomotoras domesticadas que llegarán a las puertas de las casas” circular a 40 km/h, disponiendo en los cruces de un espacio de frenado.



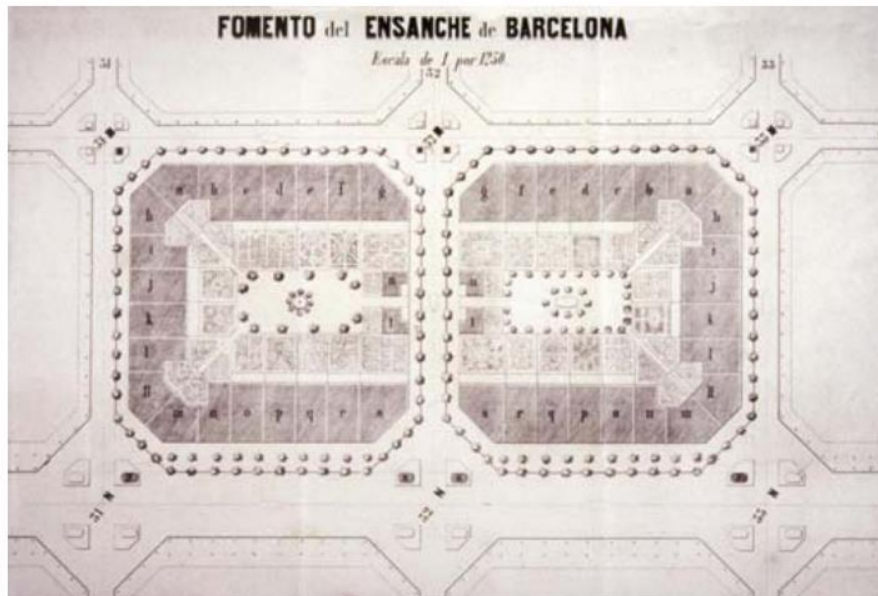
**Figura 1.3.** a) Luz solar a lo largo del día sobre la manzana. b) Altura de los edificios y penetración del sol a 45° (Moliner Vázquez, 2010).

En la Figura 1.4 se observa parte del plano original donde se dejaba un lado de la manzana sin edificar y junto con la manzana contigua se formaba un jardín interior atravesado por una de las calles. La Figura 1.5 muestra las formas básicas para agrupar las manzanas de acuerdo con El Plan Cerdà, como únicamente se construía en dos laterales de la manzana, estas quedaban o con dos laterales contruidos en forma de L y jardín vecinal, o edificando dos lados paralelos de la manzana, quedando un jardín rectangular entre los edificios. Las manzanas contruidas en forma de L, al agruparlas de cuatro en cuatro, uniendo los jardines de todas ellas, dejaban un gran espacio ajardinado en el centro, atravesado por dos calles perpendiculares. Las segundas, donde quedaban edificdos dos laterales paralelos, al agruparlas sucesivamente, uniendo longitudinalmente sus lados contruidos, daban como resultado un gran jardín longitudinal (Moliner Vázquez, 2010).

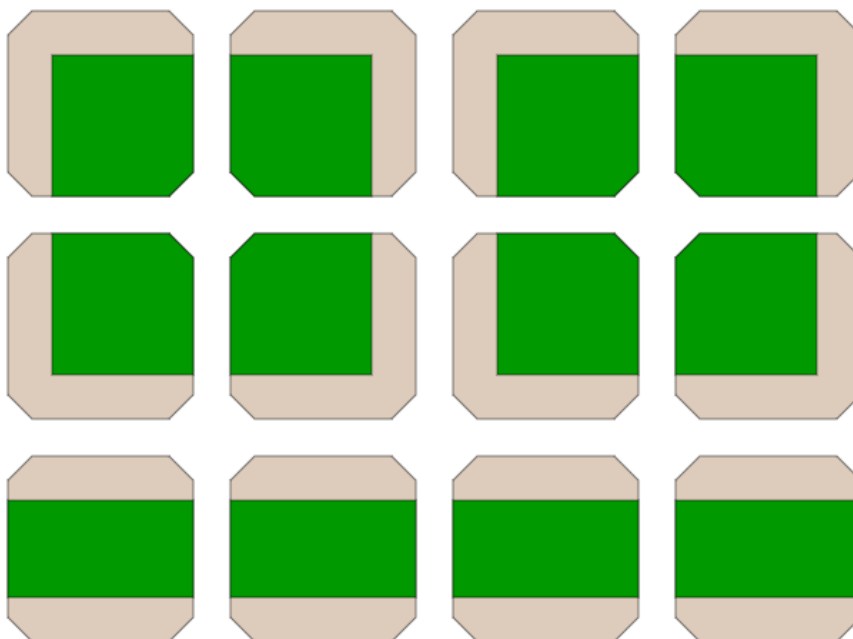
El *Proyecto de Reforma y Ensanche de Barcelona* finalmente fue aprobado por el Real Decreto de 31 de mayo de 1860 del Ministerio de Fomento. A partir de esta fecha, dio comienzo el complejo proceso de urbanización de Barcelona (Nóvoa, 2009).

Siguiendo con las ideas de Moliner Vázquez (2010), el proyecto sufrió modificaciones importantes debido a la especulación urbanística y el deseo de los propietarios de los terrenos

de disponer de mayor cantidad de metros edificables. En primer lugar, se ocuparon los espacios centrales de las manzanas destinados a jardines para la construcción de pequeñas industrias y talleres. A continuación se edificaron los dos laterales de la manzana que quedaban libres, dejándola cerrada totalmente. Por otro lado, se aumentó la altura de los edificios a 20 m, igualándola a los 20 m de anchura de la calle, ya que aun con esta altura, estando el sol a 45°, iluminaría cualquier edificio en su totalidad sin que ningún edificio vecino le hiciera sombra. También se pensó que se podían añadir más pisos al edificio si la altura de éstos era igual a la anchura de entrada respecto a la fachada, ya que de esta manera se mantendría la iluminación.



**Figura 1.4.** Modelo de unidad vías e intervías propuesto por Idelfonso Cerdá (Magrinyà Torner, 2009).

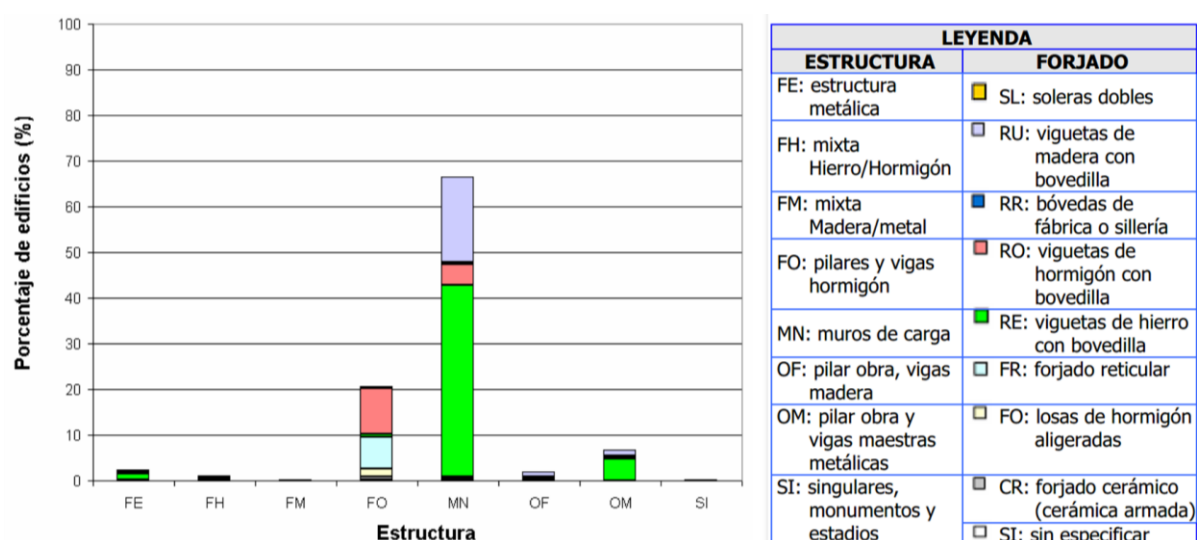


**Figura 1.5.** Formas básicas de las manzanas de acuerdo con el plan original de Cerdá (Moliner Vázquez, 2010).

## 1.4. ESTRUCTURA TÍPICA A EXPLORAR

En este apartado se expone la de estructura típica que nos encontramos en el Eixample, en la Figura 1.7 y Figura 1.8 se pueden observar los tipos de edificios encontrados en el distrito, se distinguen claramente: los de esquina o chaflán (Figura 1.7) y los que se encuentran en medio de la manzana (Figura 1.8). Según (Moreno-González & Bairán, 2011) en cada manzana o bloque hay un promedio de 25 edificios, en su mayoría son edificios de obra de fábrica de ladrillo (edificios de mampostería), aunque es frecuente encontrar que entre dos edificios viejos se haya construido uno nuevo de hormigón armado con forjados reticulares u ocasionalmente, metálico.

En la Figura 1.6 podemos ver el porcentaje por tipo de estructura de los edificios y tipos de forjados que se encuentran en el Distrito del Eixample, donde más del 60% de los edificios son de muros de carga y le siguen en porcentaje los edificios con estructura porticada de hormigón (20%) el resto de configuraciones estructurales no resultan significativas en comparación con los mencionados anteriormente (menos del 10%).



**Figura 1.6.** Porcentajes de edificios según su estructura y forjado para el distrito del Eixample (Lantada Zarzosa, 2007).

La mayoría de los edificios son de muros de carga y muestran un esquema repetitivo: cimentación superficial sobre zapatas corridas bajo muros, o aisladas bajo pilares, los elementos resistentes son muros de carga y elementos de sustentación en planta baja, sobre un sistema de jácenas metálicas o de pórticos de hormigón se apoyan las paredes de carga o bien secundarias, normalmente las jácenas metálicas se apoyan sobre paredes de mampostería. Los edificios presentan una geometría rectangular y en la parte central de los edificios suele existir uno o más núcleos parcialmente cerrados mediante paredes de fábrica de ladrillo de 10 cm de espesor, formados alrededor de las cajas de escaleras o de los patios de luces (Moreno-González & Bairán, 2011).



De acuerdo con Moreno-Gonzales y Bairán, la distribución de las paredes de carga responde a tres esquemas estructurales fundamentales:

- Los muros de fachada (calle y patio de manzana) son de 30 cm de espesor y actúan como paredes de carga (muros portantes) junto a un conjunto de paredes interiores de carga, paralelas a aquéllas, de 15 cm de espesor.
- En el caso de edificios estrechos, el forjado se forma en sentido transversal actuando las paredes de medianería (secundarias) como muros de carga.
- En el caso de edificios de esquina (Figura 1.7) la distribución es en forma trapecial, las fachadas de calle y patio actúan como paredes de carga, se dispone de una segunda pared de carga interior paralela a la fachada de calle y se utilizan otras paredes interiores como elementos de carga. De esta forma, existen paredes de carga en, al menos, tres direcciones, separadas angularmente a  $45^\circ$  (una dirección transversal, paralela al chaflán, y dos direcciones diagonales al eje y paralelas a los lados de la manzana).



**Figura 1.7.** Edificios de esquina o chaflán, ubicados en la intersección de las calles Villarroel y París en el Eixample Izquierdo.



**Figura 1.8.** Edificio típico en medio de la manzana. Este se encuentra ubicado en la calle de Villarroel en el Eixample Izquierdo.

Los edificios en chaflán suelen ser más complicados de analizar a la hora de encontrar los muros de carga y la cimentación de éstos. Suelen ser los más solicitados para realizar un estudio de georradar.

Además Moreno-González & Bairán (2011) describen los edificios del Eixample en cuatro épocas o períodos: Pre-modernismo (1860-1900), modernismo (1890-1910), post-modernismo (1910-1936) donde el sistema constructivo predominante es la mampostería y el último período se da a partir de la década de los 60, cuando el hormigón armado como sistema constructivo en edificaciones empieza a ser importante, dando lugar al comienzo de la arquitectura contemporánea (Moreno-González & Bairán, 2011). Los edificios del distrito tienen distintas alturas, pero en media tienen 7 niveles (Lantada Zarzosa, 2007) donde el primer nivel suele tener una altura diferente al resto de los pisos y estar destinados al comercio.

### 1.4.1. NUEVAS EDIFICACIONES EN EL DISTRITO

El nuevo rumbo que ha tomado el Distrito del Eixample es el de agotar la edificabilidad remanente que existe en los edificios que en su momento no lo hicieron, respetando el plan urbanístico original donde el aumento de plantas se puede hacer hasta cinco plantas por encima de la planta baja en las calles de 20 metros, las habituales de la trama Cerdà, y un aumento de seis plantas por encima de la planta baja en las avenidas o paseos más anchos. No solamente en Barcelona, sino también en Madrid, Bilbao o Pamplona se está aprovechando este espacio en el tejado (Comorera, 2014).

El artículo periodístico de Comorera informa sobre una de las empresas responsables por este tipo de obras llamada *La Casa por el Tejado*, realiza este tipo de obras utilizando módulos prefabricados de producción industrial instalados y acoplados en poco tiempo por vía aérea (Figuras 2.9 y 2.10). Lo primero es captar inversores y después negociar la compra del llamado derecho de vuelo, potencial de edificación por arriba que puede tener la comunidad de propietarios o personas concretas del edificio o de fuera de él.

Durante la fase de reconstrucción de Barcelona para los Juegos Olímpicos del año 1992 se planteó un rejuvenecimiento de las fincas, instalando nuevos elementos en aquel entonces. Los recrecidos de esta época son generalmente construcciones pesadas donde se eliminaba la *cámara de aire* o espacio existente entre el falso techo del último piso y el tejado. Este tipo de construcciones representan un inconveniente para la habitabilidad del edificio en general, sobre todo a los habitantes del último piso. Estas razones hacen que las construcciones de prefabricados hayan tenido tan buena acogida, si a esto se le suman las exploraciones con Georradar las molestias desde el proceso de exploración hasta la instalación de la nueva construcción son mínimas.

Los edificios típicos del Eixample, al explorar el tipo de cimentación que tienen, no admiten mucha carga por encima de la que ya tienen. Por tanto, elegir los materiales de recrecido ha sido la tarea principal en los últimos años. El hormigón y los ladrillos son materiales muy pesados que al ser utilizados como material de recrecido sobrepasan los niveles de seguridad exigidos, teniendo que optar por un refuerzo de la cimentación; a esto hay que sumar que las construcciones son largas y suelen ser molestas para los vecinos de edificios habitados. El acero y la madera aunque son más ligeros representan un problema a la hora del mantenimiento. Por esto el auge de “áticos pre-fabricados” que son edificaciones ligeras y funcionales y tienen una duración de tres a cuatro meses y las molestias y ocupación de zonas comunes son mucho menores (Comorera, 2014).

Para la realización de cualquier obra sobre una edificación se deben tener a mano los planos estructurales de la misma. Recordando la forma de construcción del Distrito del Eixample y la edad de los edificios, muchos de estos carecen de planos de cimientos para un correcto cálculo de la carga admisible. Las ventajas que ofrece el georradar para dimensionar las cimentaciones y saber la profundidad son muchas, entre las que se cuenta: la velocidad del ensayo, no es un



método ruidoso o molesto para los vecinos de edificios habitados y es un método no destructivo. Una desventaja puede ser que no siempre se pueden corroborar los resultados.



**Figura 1.10.** Montaje de una obra nueva (ático) por la empresa La casa por el tejado (Vendrell Felici, 2015).



**Figura 1.9.** Grúa utilizada para el montaje de áticos en la zona del Eixample (Vendrell Felici, 2015).

## CAPÍTULO 2. TEORÍA GENERAL SOBRE GEORRADAR

---

## 2.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La intervención en edificaciones requiere tener conocimiento del estado actual de la estructura, distribución de la infraestructura y la existencia o no de patologías. En muchas ocasiones obtener esta información por los medios clásicos “suelen ser costosas, consumen mucho tiempo y pueden recurrir a técnicas que alteren o dañen algunas partes básicas de la estructura o comprometan la seguridad estructural” (Barraca, Almeida, Varum, Almeida, & Senos Matias, 2016) por lo que se suele recurrir a métodos no invasivos.

Los edificios ubicados en centros urbanos como el Distrito del Eixample, tienen una alta probabilidad de encontrarse habitados y al ser obras antiguas no se conservan planos estructurales por lo que se necesita saber del estado de su cimentación sin alterar el estado de la edificación ni molestar a los habitantes de los mismos, por estas razones existe una creciente demanda en técnicas no destructivas o NDT (Non Destructive Testing, por sus siglas en inglés) que ofrecen una amplia gama de productos y técnicas para evaluar la situación de las edificaciones sin comprometer su seguridad o estado estructural. En este caso se va a exponer el uso del georradar o GPR como se llamará de ahora en adelante.

El radar de penetración terrestre, GPR por las siglas en inglés de *Ground Penetrating Radar* es una técnica no destructiva que se utiliza para la exploración de cimentaciones en edificios mediante un conjunto de técnicas electromagnéticas diseñadas principalmente para la localización de objetos o interfaces enterradas debajo de la superficie de la tierra o localizadas dentro de una estructura visualmente opaca (Daniels, 2004).

El objetivo de este capítulo es explorar los conceptos básicos sobre el georradar que es el instrumento utilizado en el estudio, por tanto, es imprescindible conocer sus características. El objetivo general para este capítulo *es mostrar que es el GPR, sus características principales, aplicaciones y ampliar el tema de las antenas.*

En cuanto a los antecedentes históricos del georradar, generalmente la historia comienza con los experimentos llevados a cabo por Heinrich Hertz a finales del siglo XIX. Estos experimentos dieron una verificación experimental de la teoría electromagnética de James Clerk Maxwell y demostraron que las ondas de radio se reflejan en objetos metálicos (Sarkar & Salazar, 2014). Este aparato tuvo su auge y desarrollo durante la Segunda Guerra mundial ya que fue un instrumento esencial durante esta batalla.

El método que utiliza el georradar no ha sido el más utilizado a través de la historia y muestra su etapa más prolífera después de los años 70, porque se obtuvieron diversidad de aplicaciones y se desarrollaron diversos métodos de estudio, tratamiento de los datos y equipos (Pérez Gracia, 2001).

El primer uso de señales electromagnéticas para determinar la presencia de objetos de metal remotos generalmente es atribuida a Hülsmeier en 1904, pero la primera descripción de su uso para la localización de objetos enterrados apareció seis años después en una patente alemana

de Leimbach y Löwy. El trabajo de Hülsmeier en 1926 es, aparentemente, el primero en usar técnicas de pulso para determinar la estructura de objetos enterrados. Este notó que cualquier variación dieléctrica, que no necesariamente involucra la conductividad, puede también producir una reflexión de las ondas electromagnéticas, esa técnica a través de la fácil realización de fuentes direccionales tenía una ventaja sobre métodos sísmicos. Las técnicas de pulso fueron desarrolladas a partir los años 1930 y se probaron en profundidades considerables de hielo, agua fresca, depósitos de sal, desiertos de formaciones de arena y roca. Al principio de los años 70 surgió un nuevo interés en el tema durante las investigaciones lunares. Para estas aplicaciones se explotó una de las ventajas del georradar sobre las técnicas de prospección sísmica, esto es la habilidad de usar el aparato de manera remota y transductores que no fuesen de contacto para radiar energía en lugar de la necesidad de contacto con el suelo de las investigaciones sísmicas. Desde los años 1970 hasta el presente el rango de aplicaciones ha aumentado. (Daniels, 2004).

Se debe destacar la creación de un congreso internacional monotemático sobre radar del subsuelo, que tiene lugar cada dos años y en el que cada vez se presenta un mayor número de contribuciones y al que acuden cada vez más participantes provenientes de muy distintos campos de estudio (arqueólogos, ingenieros, físicos, geofísicos, etc.). El desarrollo que está alcanzando el método ha provocado que muchos investigadores se dediquen a la experimentación en laboratorio para determinar las características de propagación de las ondas en los distintos medios. (Pérez Gracia, 2001).

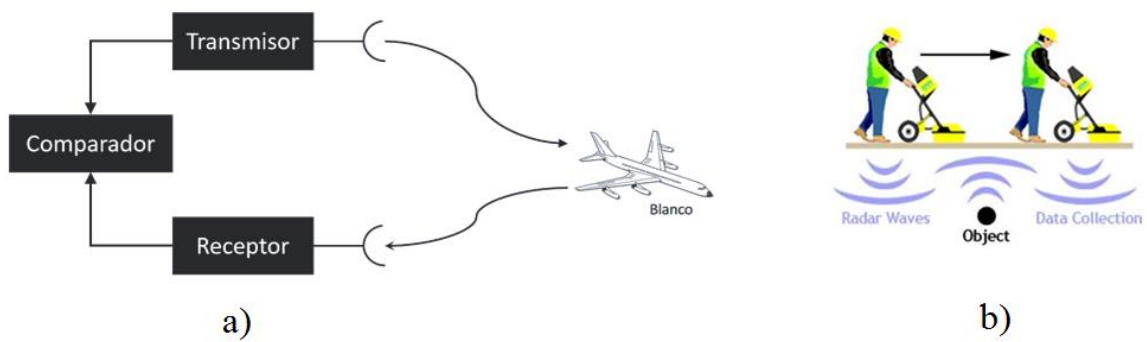
## 2.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL GEORRADAR

Como el georradar y el radar siguen los mismos principios entre las funciones más básicas que lleva a cabo se pueden mencionar las siguientes:

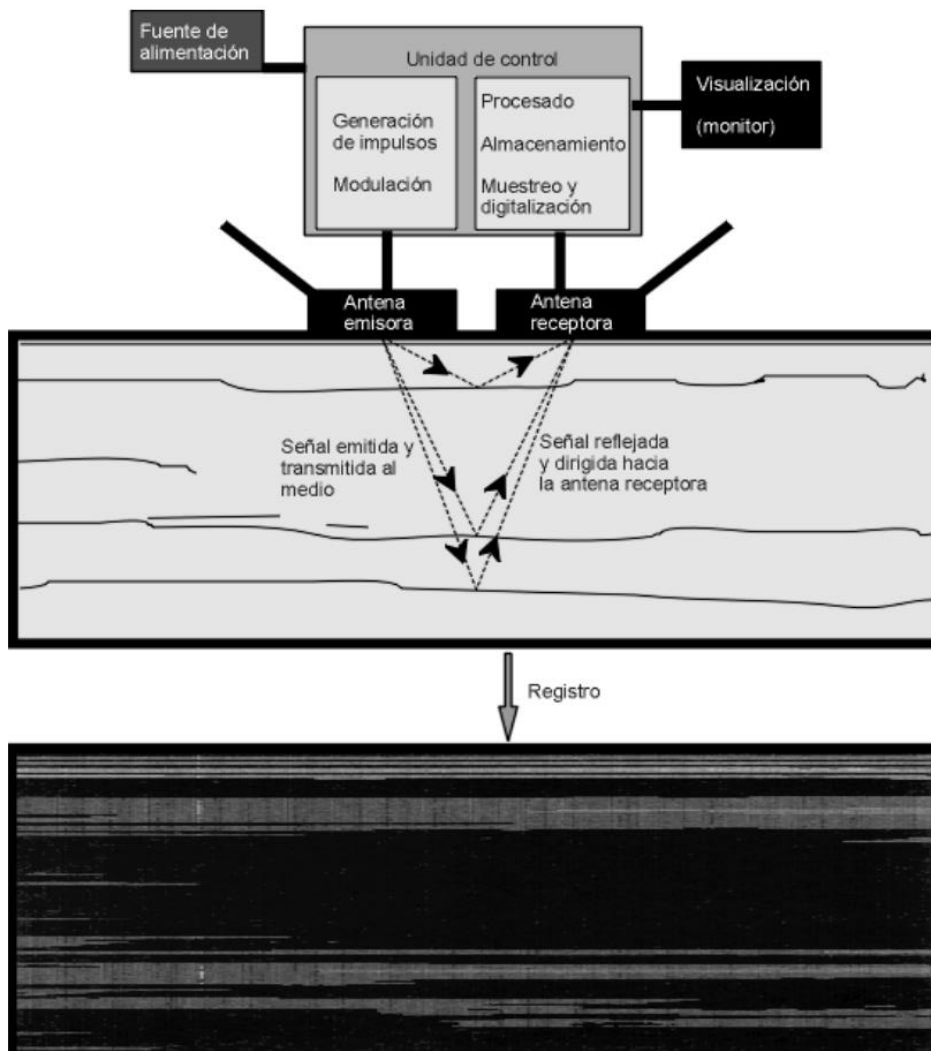
- Detección de un blanco: determinar si hay blanco o no.
- Estimación: extracción de información de la señal detectadas, para la obtención de características del blanco con una determinada precisión y resolución. Estas características pueden ser: posición, velocidad, forma y tamaño.

Ambos procesos, detección y estimación, están relacionados, y uno de ellos no tiene sentido sin el otro. Un radar consta de una antena transmisora, emitiendo una radiación electromagnética generada por un transmisor, una antena receptora y un dispositivo detector de energía o receptor, tal como se puede observar en la Figura 2.1a (González & Marcello, 2002).

En la Figura 2.2 se pueden observar los distintos componentes de un GPR, el proceso de detección de discontinuidades y un radagrama. Asimismo la Figura 2.3 muestra una interpretación tipo de las reflexiones de un radagrama, sobre cualquier tipo de estructura se sigue el mismo principio básico. A continuación se describen las componentes del georradar.

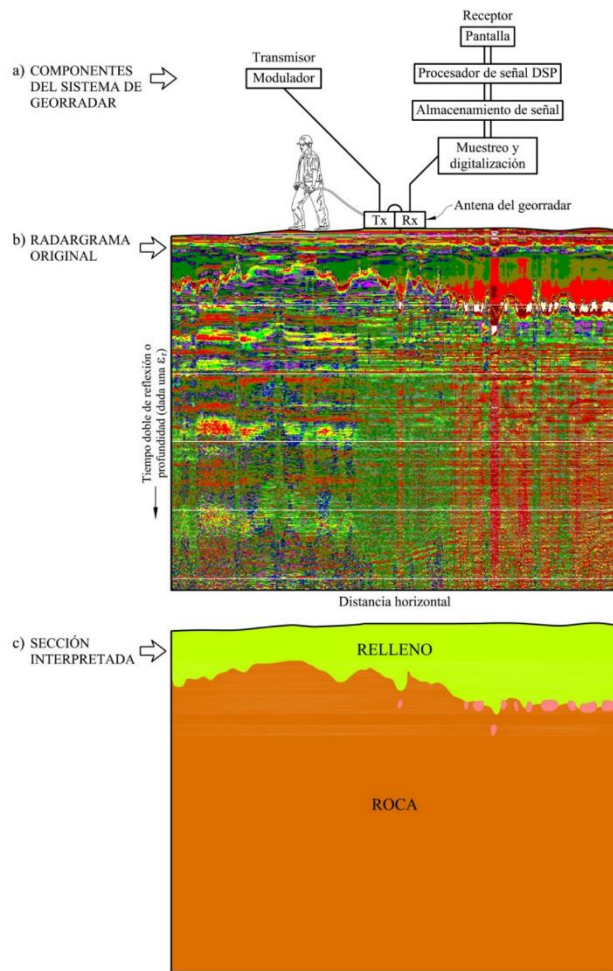


**Figura 2.1.** (a) Esquema básico del funcionamiento de un radar, modificada de González & Marcello (2002). (b) Funcionamiento básico de un georradar (Worksmart, Inc., 2012).



**Figura 2.2.** Esquema simplificado de las diferentes componentes de un equipo de GPR y el registro del resultado o radagrama. (Pérez Gracia, 2001).





**Figura 2.3.** Reflexiones en diversos puntos del subsuelo, el principio es aplicable a la exploración de cualquier estructura desde una de sus caras libres. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

La propagación de los pulsos electromagnéticos del georradar hacia un medio se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas. Sus fundamentos teóricos son los mismos que un radar convencional emplea para detectar un objeto, pero el georradar utiliza un ancho de banda más amplio, y las antenas receptora y emisora se dirigen hacia el medio a estudiar (subsuelo, estructura u objeto). Cada medio posee unas características electromagnéticas propias que son: la permitividad o constante dieléctrica relativa  $\epsilon$ , la permeabilidad magnética relativa  $\mu$  y la conductividad eléctrica  $\sigma$ . (GeoService Perú).

### Velocidad de propagación de la onda

La constante de fase de la onda  $\beta$  que es una de las expresiones de la determinación del factor de atenuación de la onda, permite determinar la velocidad de la onda en el medio material en el cual se está propagando ya que:

$$\beta = \frac{\omega}{v}$$

Y a su vez:

$$\beta = \omega R_e \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} R_e \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Esto está relacionado con la permitividad relativa  $\epsilon_r$  del material donde se propaga la onda que es una constante adimensional y la permitividad dieléctrica del vacío ( $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ). La permeabilidad relativa del material ( $\mu_r$ ) depende de la susceptibilidad magnética del mismo y  $c$  es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío, se expresa de la siguiente forma:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La permeabilidad relativa del material para medios no magnéticos en estudios con georradar se simplifica porque es igual a 1. Por tanto la expresión más usual queda como:

$$v = \frac{c}{R_e \sqrt{\epsilon_r}}$$

### 2.3. APLICACIONES DEL GPR

Las aplicaciones del georradar son muy variadas. Se ha investigado su uso desde investigaciones arqueológicas hasta el mantenimiento de pavimentos de carreteras y aeropuertos. Una lista no exhaustiva de las aplicaciones del georradar se brinda a continuación (Daniels, 2004).

- Investigaciones arqueológicas
- Inspección de pozos
- Análisis de cubierta en puentes
- Evaluación del estado de construcciones
- Investigación de suelos contaminados
- Detección de minas enterradas (antipersonal y antitanque)
- Evaluación de hormigón armado
- Investigaciones forenses
- Investigaciones geofísicas
- Imágenes médicas
- Detección de tuberías y cables
- Exploración planetaria
- Teledetección desde aviones y satélites
- Reconocimiento de las condiciones de carreteras
- Aplicaciones de seguridad

- Espesores de nieve, hielo y glaciares
- Condición de la madera
- Revestimientos de túneles
- Condiciones de las paredes

Durante las investigaciones arqueológicas, desde Egipto hasta castillos y monasterios de Europa se obtiene la calidad de imagen correcta pero la comprensión requiere la interpretación conjunta de los especialistas en radar y arqueólogos. Su uso para la detección y desactivación de minas terrestres antipersonas abandonadas es importante para la recuperación de muchos países después de la guerra. Es muy útil para determinar el espesor de las capas de pavimento en las carreteras, con la ventaja adicional aparte de ser no destructivo, puede ser usado a alta velocidad y obtener un mapa continuo.

No se detallan las aplicaciones en general del Georradar porque son muchas y muy amplias, sin embargo, se quiere recalcar su uso en la investigación de cimentaciones para edificios antiguos. Se han llevado a cabo investigaciones en este campo por el Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la Universitat Politècnica de Catalunya. Estos casos de estudio se muestran en un capítulo posterior.

## 2.4. ANTENAS EN DISPOSITIVOS GPR

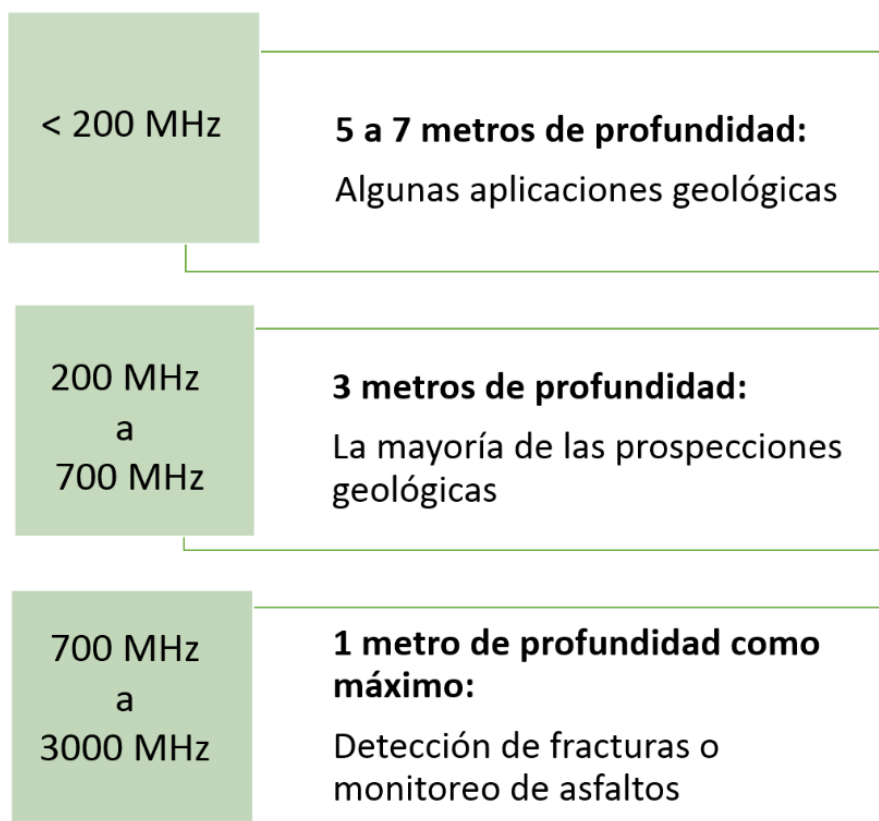
El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Std. 145-1983). Si bien sus formas son muy variadas, todas las antenas tienen en común el ser una región de transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre, a la que puede además asignar un carácter direccional (Cardama Aznar, y otros, 1998).

El objetivo fundamental de la antena es brindar información sobre el objetivo que se estudia a través de la emisión de ondas y la recepción de la energía reflejada. En este capítulo se brindan informaciones básicas sobre el uso de las antenas, los diferentes tipos que existen, las limitaciones y su importancia en la exploración GPR enfatizando en las cimentaciones.

Se utilizan dos tipos fundamentales de antenas atendiendo a su sistema, puede ser: monoestático o biestático. Los sistemas monoestáticos usan un elemento común para emitir y recibir la señal sin embargo, la mayoría de los equipos GPR utilizan antenas biestáticas que tienen el transmisor y el receptor alojados en el mismo lugar. Los requerimientos mínimos de las antenas son: La habilidad de emitir un gran rango de frecuencias, típicamente sobre el rango de 100 a 1000 MHz o más; características de fase lineal sobre el rango operativo de frecuencias y características de polarización predecibles (y preferiblemente constantes) sobre el rango operativo de frecuencias (Manacorda, Persico, & Scott, 2015).



La elección del sistema de antena se ve condicionado por la naturaleza del objetivo que se desea explorar. Todos los objetivos tienden a despolarizar las ondas electromagnéticas incidentes sobre ellos, el ejemplo más extremo se refiere a objetos alargados y delgados (en términos de longitud de onda). Si el objeto en cuestión es metálico, entonces la polarización de la onda reflejada es paralela a su eje; si es no metálico, entonces la polarización es ortogonal al eje. (Roberts and Daniels 1996). En el caso de sistemas de radar diseñados para localizar cables y tuberías, esta es una propiedad muy útil que puede, en principio, ser usada para mejorar la respuesta del objetivo requerido. Un conocimiento completo de las características de despolarización de objetos en general, particularmente cómo se comportan sobre un rango de frecuencias, puede ser una gran ayuda en la detección y clasificación de objetivos (Manacorda, Persico, & Scott, 2015).



**Figura 2.4.** Profundidad de alcance y aplicación dependiendo de la frecuencia de la antena. (Persico, 2014).

Los usos y características de las antenas son muy variados, en la Figura 2.4 se trata de clasificar de forma general la profundidad operativa y la aplicación de las antenas atendiendo a su frecuencia, como se ha indicado antes, esta información es general y no exhaustiva por lo que se pueden encontrar muchas excepciones, sin embargo sirve como punto de partida para ilustrar las frecuencias operativas para los trabajos de exploración de cimentaciones en edificios de mampostería antiguos.

Algunas consideraciones para elegir el mejor sistema de antena va a depender del tipo de objetivo y el tipo de sistema de radar. Por ejemplo, depende de donde se encuentre el objeto con una superficie plana la polarización lineal es la opción obvia para el diseñador del sistema. Si el objeto enterrado es una tubería o cable, entonces la retrodispersión del campo muestra una característica de polarización que es independiente del estado de polarización del campo incidente. La elección de un sistema dependiente de la polarización debe considerarse con cuidado porque puede que no sea posible cubrir todos los tamaños de objetos con una antena con un esquema de polarización. (Daniels, 2004).

### 2.4.1. Parámetros de una Antena

Los parámetros de una antena son parámetros susceptibles de ser medidos. Permiten, desde el punto de vista de sistemas, tratar la antena como un dipolo. Se definen parámetros de tipo circuital y de tipo direccional. La mayoría de estos parámetros se definen en transmisión, pero son válidos también en recepción (Monachesi, Frenzel, Chaile, Carrasco, & Gómez López, 2011). Los principales parámetros de las antenas son:

- Directividad y ganancia
- Diagrama de radiación o patrón de radiación
- Ancho del haz
- Impedancia de entrada
- Eficiencia de la antena
- Polarización
- Campos de Inducción de Radiación
- Longitud eléctrica y longitud física
- Ancho de Banda
- Intensidad de Campo
- Relación frente detrás

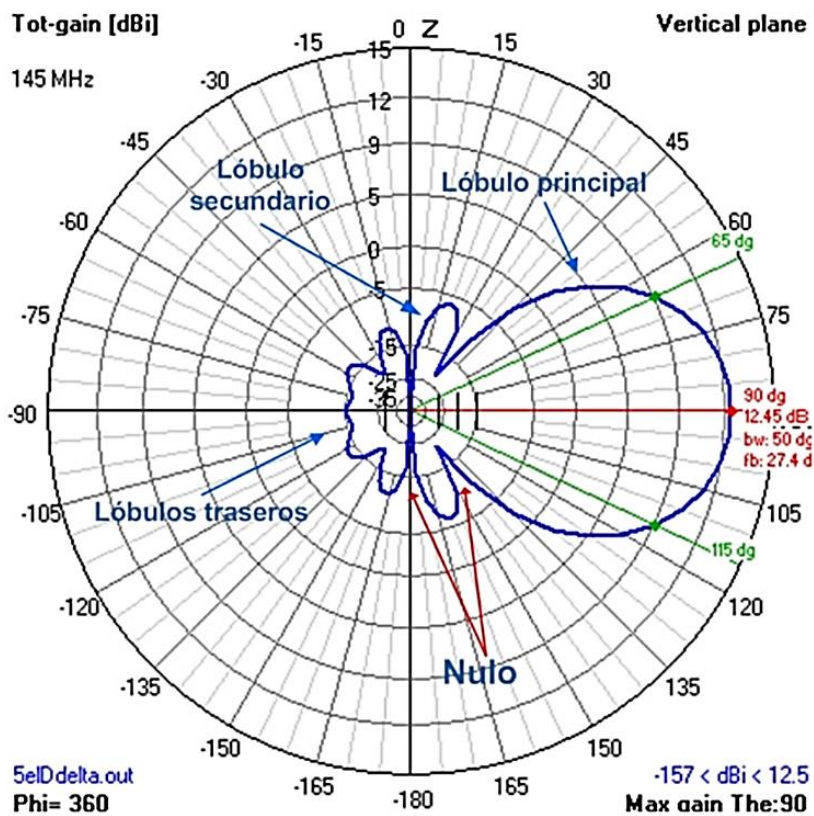
### Diagramas de radiación

Los diagramas de radiación son representaciones gráficas del frente de ondas que radia una antena en las diferentes direcciones del espacio. Estos diagramas indican en qué dirección del espacio la antena es más sensible, así como el área efectiva (ángulo efectivo) que podrá ser detectada por la energía radiada por la antena. (Pérez Gracia, 2001)

El diagrama puede ser obtenido por la colocación de una antena fija de prueba en relación a un entorno donde se está midiendo el diagrama, también por la rotación de la antena en torno a sus ejes, donde las señales enviadas son recibidas en un receptor capaz de discriminar con precisión la frecuencia y la potencia recibidas. Se puede representar esta medición en forma cartesiana o polar (observar un ejemplo en la Figura 2.5) (Monachesi, Frenzel, Chaile, Carrasco, & Gómez López, 2011).

De acuerdo con Pérez Gracia (2001) las gráficas representan la densidad de potencia relativa a una distancia dada (medida en dB) en función de las tres direcciones del espacio. El tamaño y la forma de los lóbulos de radiación del campo electromagnético generado por una antena dependen también de la constante dieléctrica del medio en el cual se produce la emisión.

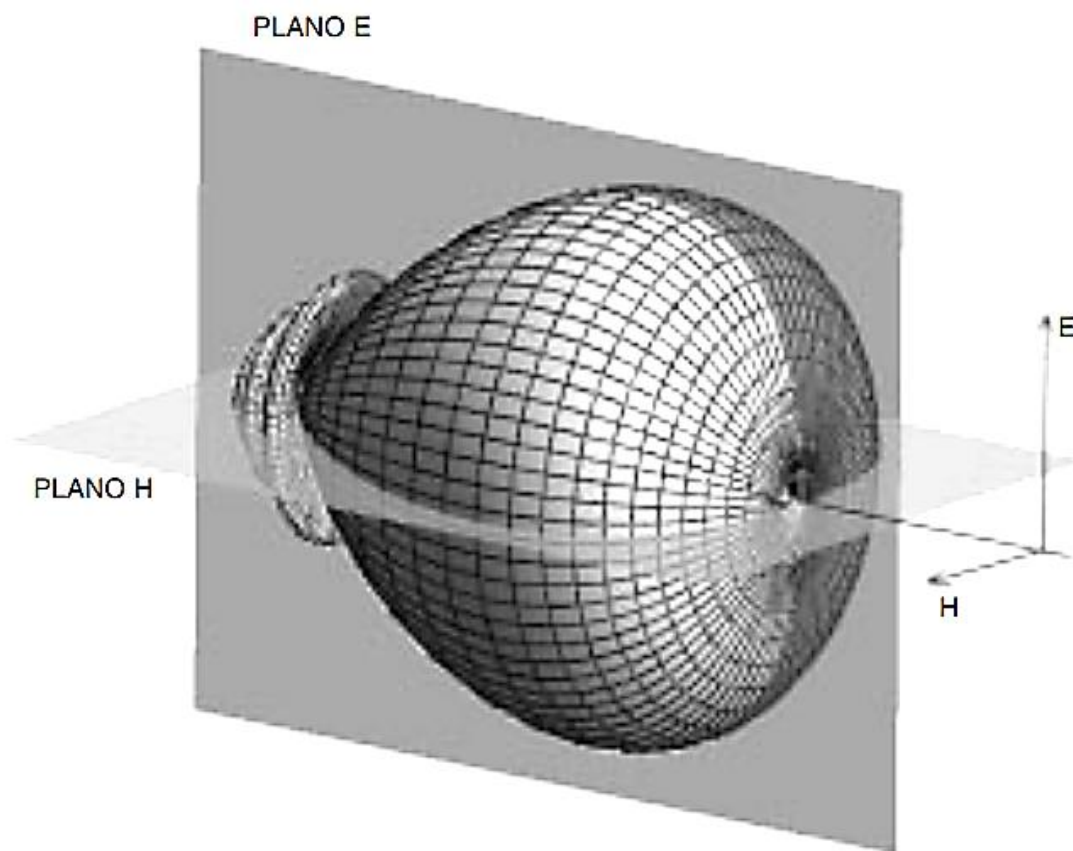
Como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de los dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico. El diagrama se realiza con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresa el campo eléctrico en función de las variables angulares ( $\theta$ ,  $\phi$ ). Como el campo es una magnitud vectorial, habrá que determinar en cada punto de la esfera de radio constante el valor de dos componentes ortogonales (habitualmente según  $\hat{\theta}$  y  $\hat{\phi}$ ) (Cardama Aznar, y otros, 1998).



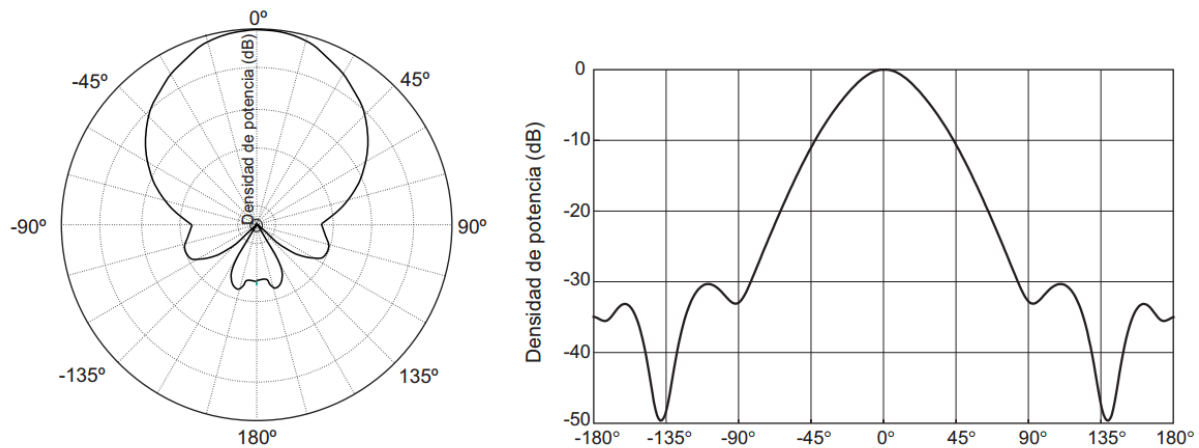
**Figura 2.5.** Ejemplo de un diagrama de radiación polar donde se pueden observar los lóbulos principal y secundario (Monachesi, Frenzel, Chaile, Carrasco, & Gómez López, 2011).

La representación suele realizarse en coordenadas esféricas mediante un esquema tridimensional (Figura 2.5), aunque en muchas ocasiones es suficiente considerar un corte de este diagrama tridimensional, representando de este modo el diagrama de radiación en dos dimensiones (Pérez Gracia, 2001). Los cortes pueden hacerse de infinitas formas. Los más habituales son los que siguen los meridianos en una hipotética esfera (cortes para  $\phi$  constante) o los paralelos (cortes con  $\theta$  constante). La información de todos los cortes del diagrama es

excesiva, por lo que se recurre a representar dicha información sólo en los planos principales. Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En el primer caso el ángulo en el diagrama polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas. La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio (Cardama Aznar, y otros, 1998). La Figura 2.7 muestra ejemplos de ambas representaciones.



**Figura 2.6.** Representación tridimensional de un diagrama de radiación en los planos H y E (Cardama Aznar, y otros, 1998).

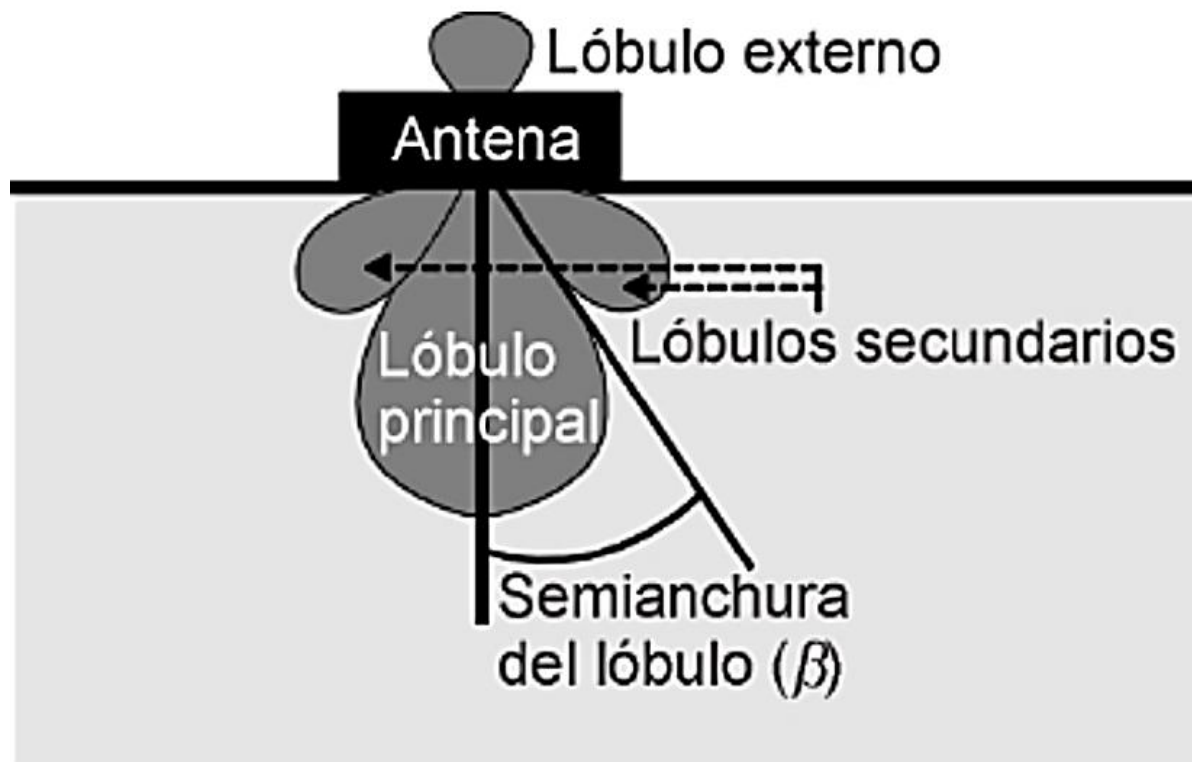


**Figura 2.7.** Diagramas de radiación representados en coordenadas polares (izquierda) y coordenadas cartesianas (derecha) (Cardama Aznar, y otros, 1998).

Estas representaciones suelen realizarse, en el caso del georradar, considerando la dirección en la cual tenemos una discontinuidad, es decir, en la dirección en la cual tenemos el contacto entre el aire y el medio a estudiar, que suele ser la de radiación máxima (se trabaja con antenas direccionales). La zona en la que la radiación es máxima se denomina haz principal o lóbulo principal, y las zonas que lo rodean y que presentan una amplitud de onda menor se denominan lóbulos secundarios. El lóbulo secundario de mayor amplitud suele ser el más próximo al lóbulo principal. Un parámetro importante de este diagrama es la anchura del lóbulo (ver Figura 2.8) o del haz a 3 dB, que se define como la distancia angular entre las direcciones del diagrama de radiación donde la energía es la mitad del valor máximo. Esta potencia mitad equivale a 3 dB menos que la máxima (Pérez Gracia, 2001).

La *relación de lóbulo principal a secundario (NLPS)* es el cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario. Normalmente, dicha relación se refiere al lóbulo secundario de mayor amplitud, que suele ser adyacente al lóbulo principal. (Cardama Aznar, y otros, 1998)

El ancho del lóbulo entre ceros, se define como la distancia angular entre las dos direcciones del espacio en las que el lóbulo principal alcanza el mínimo valor. El cociente entre el lóbulo principal y el mayor de los lóbulos secundarios se denomina relación de lóbulo principal a secundario e indica la relación de energía emitida en el haz principal de la radiación. Las antenas del georradar suelen ser antenas de media longitud de onda, es decir, antenas con una espira que funciona como un dipolo, emitiendo energía según un modelo de radiación ya conocido (Duke, 1990).



**Figura 2.8.** Esquema de un modelo de radiación de una antena donde se destacan los lóbulos principal y secundario así como la semianchura del lóbulo (Pérez Gracia, 2001).

#### 2.4.2. CARACTERÍSTICA DE LAS ANTENAS PARA SU USO EN EXPLORACIÓN DE CIMENTACIONES

Los datos obtenidos mediante GPR reflejan las características de la antena y las propiedades del medio. La resolución vertical y horizontal, profundidad de penetración, y la distancia del campo lejano dependen de la frecuencia del radar, de los efectos filtrantes del medio, del camino que recorre la antena, de la atenuación de la señal y de las características físicas de la antena (Pérez-Gracia, Di Capua, González-Drigo, & Pujades, 2009).

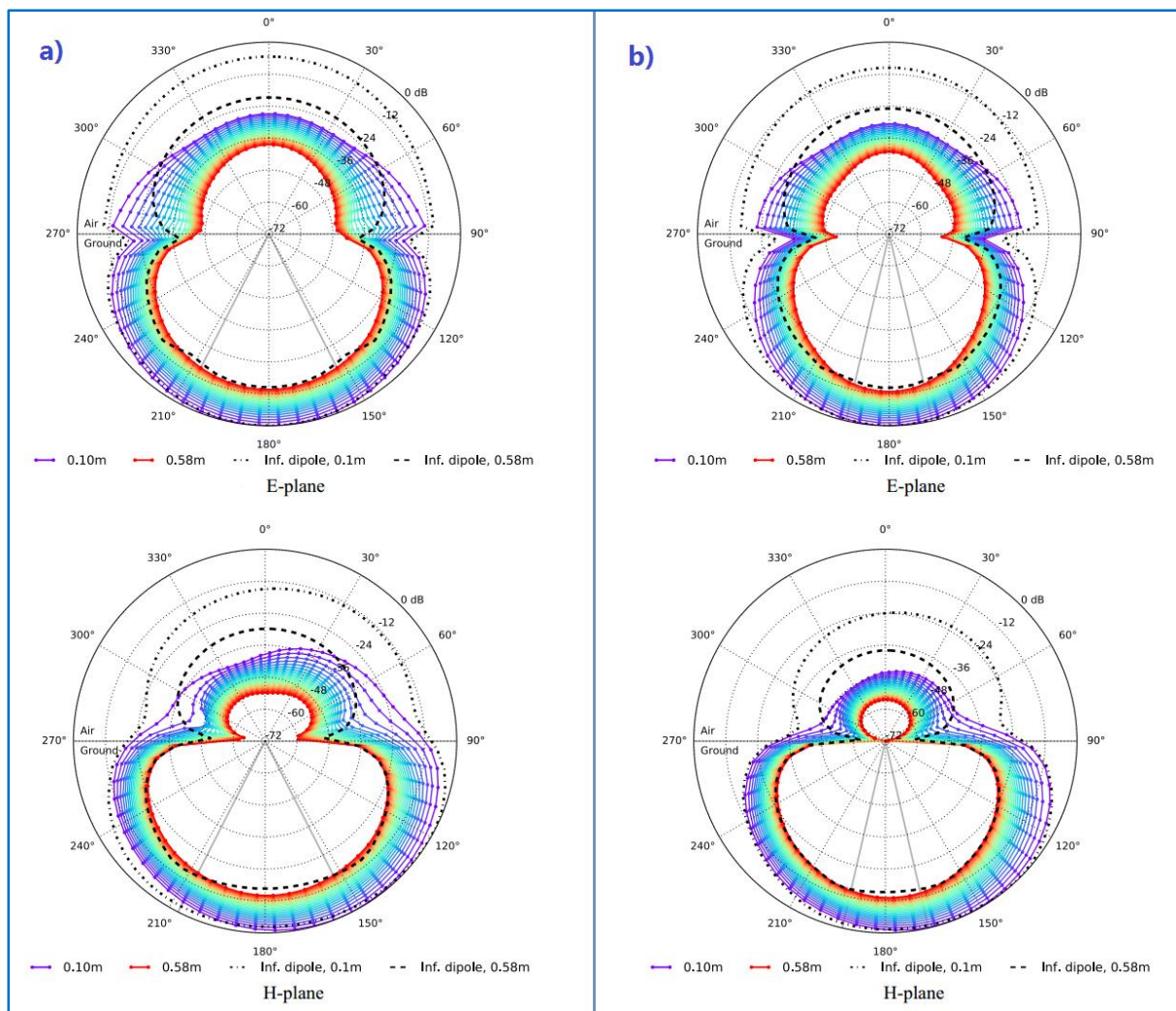
En este apartado se suponen características ideales del medio en que se propaga la radiación, es decir, el material es homogéneo, no absorbe la energía y no existen obstáculos que causen ruido en la señal. El objetivo principal es mostrar la conveniencia de un ángulo de radiación de al menos 30 grados ya que para la exploración de cimentaciones no es conveniente un ángulo menor. Según Pérez Gracia (2001) muchas de las antenas utilizadas actualmente tienen un ángulo de radiación de 45°, esto puede variar con la constante dieléctrica del medio donde se propagan las ondas.

En la exploración de cimentaciones, se realizan los estudios en el interior de los edificios. Considerando el tamaño de los equipos utilizados y si además se le adapta un carro o rueda marcadora, se limita mucho el espacio físico donde puede actuar. Esto no es un problema si se considera que con un ángulo de radiación suficientemente ancho y una profundidad de



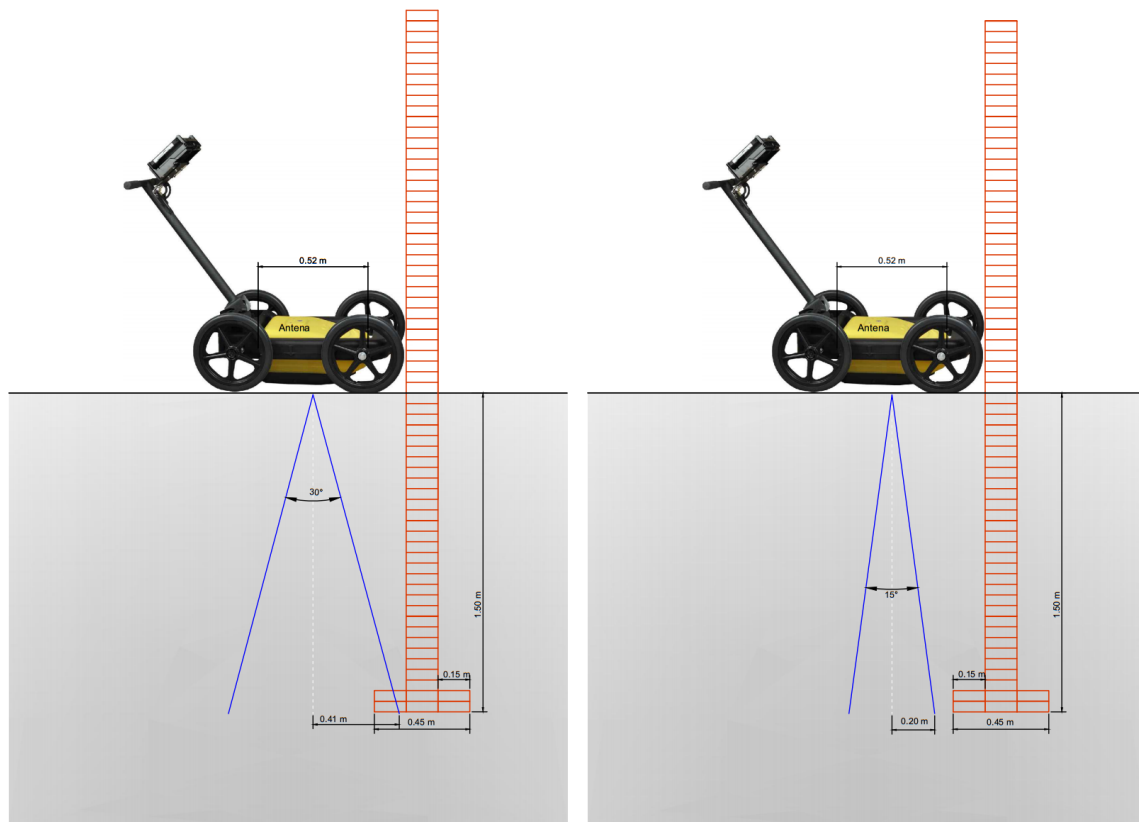
penetración también suficiente se puede aún observar parte de la cimentación de los muros porque se tiene mayor distancia horizontal en el cono de radiación. En el próximo capítulo se presentan los casos de estudio, en estos se puede observar como al principio o al final de los radagramas limitados por un muro se puede observar parte de su cimentación.

En el año 2016, Warren & Giannopoulos hicieron un estudio sobre las características de radiación de la antena de georradar utilizando técnicas numéricas de modelación para ambientes realistas. Una serie de interacciones complejas ocurren entre la antena y el entorno, provocando que la antena cambie su comportamiento. La Figura 2.9 muestra el cambio en los patrones de radiación al variar la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ) de  $\epsilon_r=5$  a  $\epsilon_r=20$ , el ángulo de radiación disminuye al aumentar la constante dieléctrica debido a que el ángulo crítico se vuelve más pequeño a medida que la permitividad incrementa (Warren & Giannopoulos, 2016). Se muestran para los planos E y H, siendo el plano H el más utilizado para las exploraciones con GPR.



**Figura 2.9.** Cambios en los patrones de radiación al variar la constante dielectrica. a) Constante dieléctrica  $\epsilon_r=5$ . b) Constante dieléctrica  $\epsilon_r=20$  (Warren & Giannopoulos, 2016).

La Figura 2.10 muestra como el avance horizontal se reduce de forma proporcional al ángulo de radiación. Aunque se entiende que éste ángulo puede variar por muchos otros factores explicados anteriormente, se apela a la geometría y espacio físico que ocupan los equipos de georradar. Esto quiere decir que para la exploración de cimentaciones en edificios antiguos se prefiere utilizar antenas con un ángulo de radiación de al menos  $30^\circ$ .



**Figura 2.10.** Diferencia de la distancia horizontal que puede ser captada por la antena teniendo la misma profundidad y distinto ángulo de radiación.

## 2.5. PROCESAMIENTO DE DATOS GPR

La interpretación de los datos de georradar se ven afectados por varios factores relacionados con la complejidad del subsuelo. La interpretación de los datos requiere densas redes de mediciones, una óptima elección de la frecuencia de transmisión y las técnicas de procesamiento de señales efectivas. El procesamiento de las mediciones GPR se ve reforzada en la actualidad por hardware de gran alcance. La elección de las antenas de transmisión de frecuencia depende principalmente de las propiedades del objetivo (tamaño y profundidad) y las propiedades frecuenciales del objetivo y el medio circundante. Aceptando el hecho de que las mediciones de GPR son lo suficientemente densas como para delimitar del objetivo y se selecciona la frecuencia adecuada, el procesamiento debe mejorar la señal GPR,



proporcionando datos suficientes para la interpretación. El sistema de procesamiento de datos GPR se compone de: corrección de tiempo cero, filtro pasa alta, filtrado de paso de banda, filtros espaciales y ganancia (Economou, Vafidis, Benedet, & Alani, 2015).

Para el procesamiento de los datos se cuenta con una variedad de programas comerciales o de circulación libre. Muchas de las rutinas utilizadas en GPR han sido desarrolladas originalmente para el procesamiento de datos sísmicos y luego adaptadas a este ámbito, gracias a las similitudes que existen entre ambos métodos. Los avances que se producen día a día en los programas y en los equipos de computación, hacen que el procesamiento de los datos se torne cada vez más accesible, reduciendo los tiempos de cálculo y esfuerzo, permitiendo así mismo la implementación de técnicas cada vez más precisas y útiles (Bonomo & de la Vega, 2014).

El objetivo general del procesamiento de la señal de georradar es presentar una imagen que pueda ser fácilmente interpretada por el operador o para clasificar la respuesta del objeto con respecto a un ensayo conocido o plantilla (Daniels, 2004).

### **Filtrado**

El término filtrado se refiere a una variedad amplia de técnicas cuyo objetivo es modificar selectivamente la amplitud o la frecuencia de las señales recibidas. Por ejemplo, la remoción del fondo, puede considerarse como una forma de filtrado. El filtrado de frecuencias temporales específicas es habitual en el procesamiento de datos de georradar. Esta técnica consiste en obtener los espectros de frecuencias que componen las señales de cada traza para luego seleccionar una porción de los mismos, eliminando el resto de las componentes. En general es posible definir filtros pasa-alta, los cuales mantienen intactas las componentes con frecuencias mayores que una determinada, pasa-baja, definidos similarmente pero en relación con las componentes de frecuencias más bajas, y pasa-banda, los cuales sólo permiten el conjunto de componentes cuyas frecuencias quedan comprendidas entre un mínimo y un máximo determinados. Como ocurre con todas las técnicas de filtrado, la eliminación de partes componentes de la señal puede implicar pérdida de información importante. Por ello, siempre es conveniente aplicarlas con sumo cuidado. Como una regla simplificada, puede utilizarse un filtro de frecuencias temporales pasa-banda cuyo rango de frecuencias permitidas coincida con el rango del georradar, de esta manera sólo se eliminará el ruido distribuido fuera de la banda útil de este último (Bonomo & de la Vega, 2014).

## CAPÍTULO 3. CASOS DE ESTUDIO

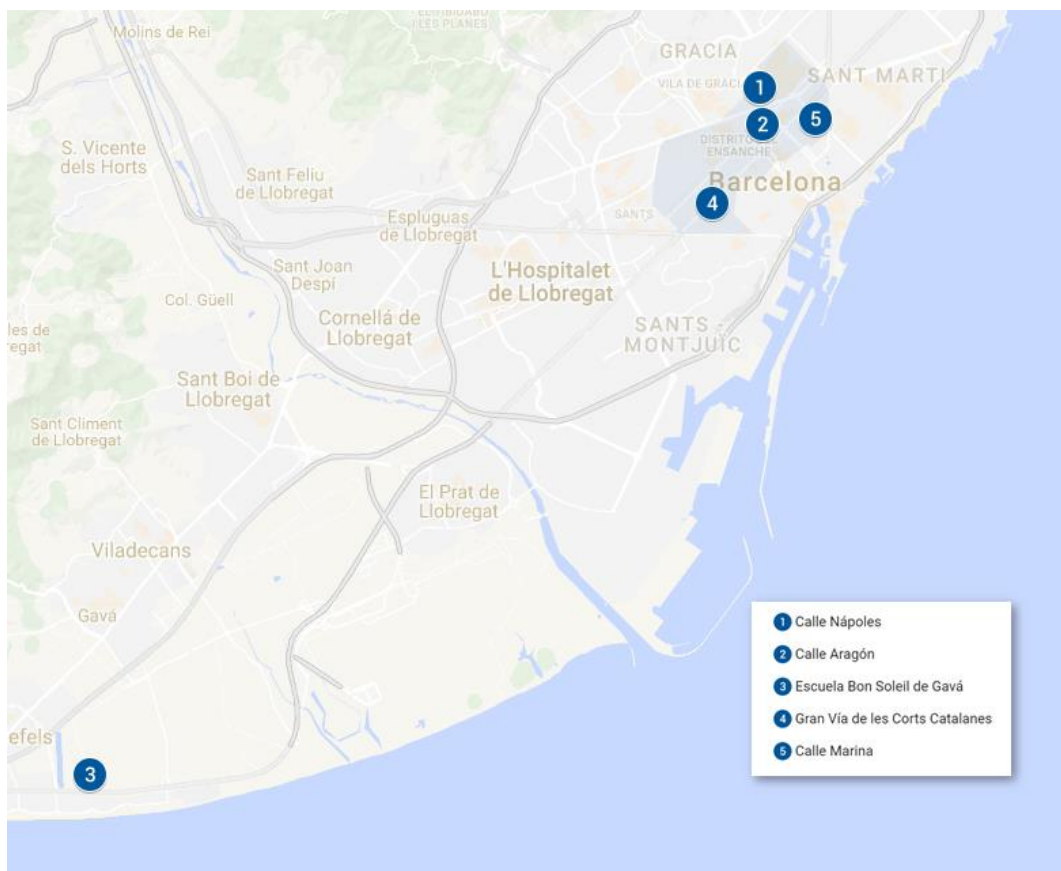
---

### 3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen los resultados conseguidos en estudios de casos reales en la ciudad de Barcelona, Gavá y Pamplona solicitados por diversas empresas consultoras de ingeniería para posteriores cálculos estructurales de los edificios que se pretenden intervenir (hacer recrecidos). En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de los edificios de la ciudad de Barcelona y el municipio de Gavá que se toman como casos de estudio.

El objetivo de este capítulo es mostrar los resultados obtenidos en casos reales aplicados a la exploración de cimentaciones de edificios antiguos y comparar estos resultados con los del modelo a escala. Se pretende mostrar la importancia que tienen estos resultados para distintos fines, tanto para las intervenciones futuras en materia estructural como por la información adicional que se obtiene: posible presencia de humedad, sótanos, tuberías de servicios, etc. lo cual le da un valor añadido al estudio.

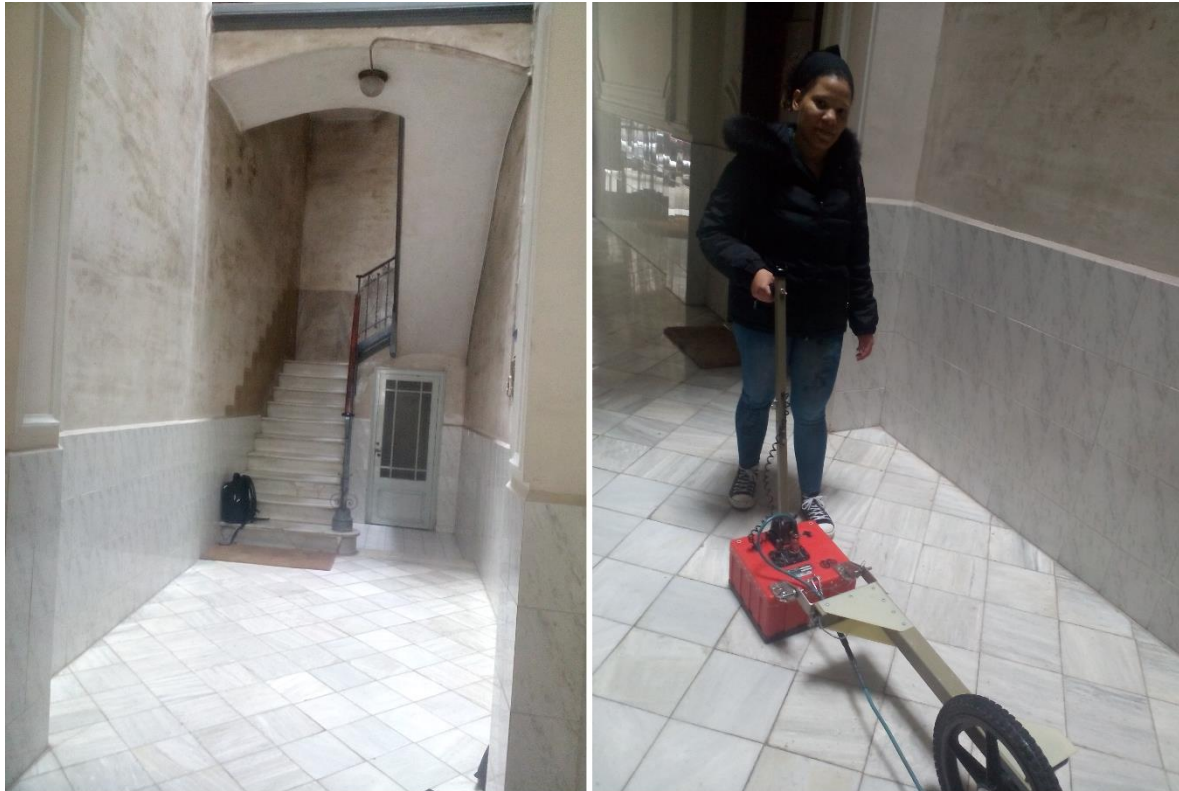
Se han utilizado un total de seis casos de los que se muestran los resultados más importantes de la detección de los elementos de cimentación, el plano general de la estructura con los perfiles y comentarios sobre las principales detecciones y los radagramas que muestran los casos generales del estudio.



**Figura 3.1.** Ubicación geográfica de los edificios estudiados de la comunidad autónoma de Cataluña utilizados como casos de estudio.

### 3.2. EDIFICIO CALLE NÁPOLES, BARCELONA

El objetivo de este estudio realizado por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC en el año 2016 es conocer la cimentación de un edificio de tres niveles. Se realizaron 12 perfiles con georradar. En la Figura 3.2 se muestra una imagen del interior del edificio, junto con la acera confirma el área de estudio.

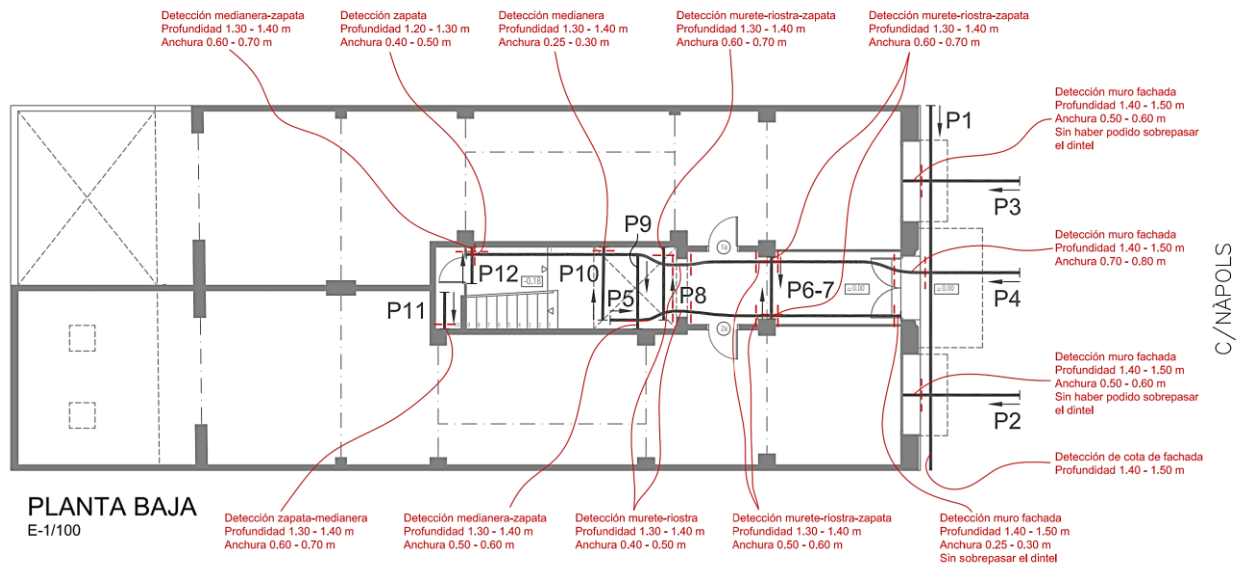


**Figura 3.2.** Interior del edificio en la calle Nápoles.

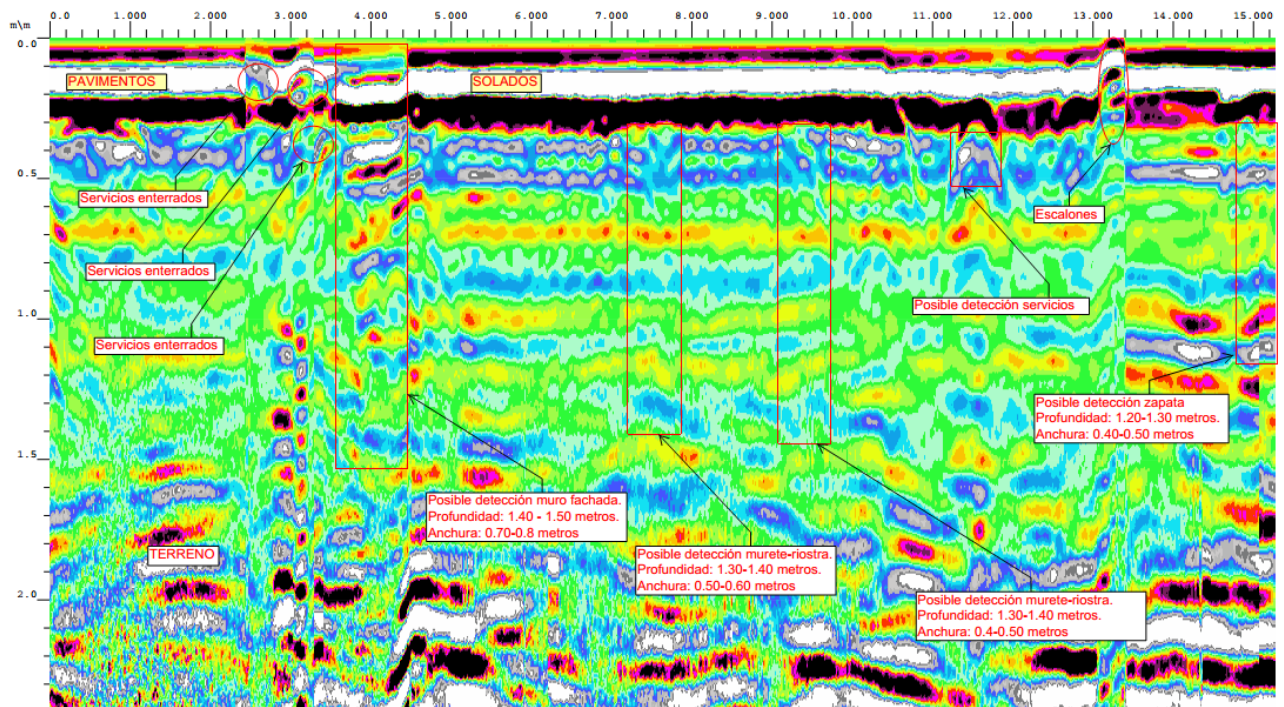
En la Figura 3.3 se puede observar el plano de la planta baja del edificio con las detecciones encontradas en los distintos perfiles, la dirección y detalles sobre los elementos encontrados, como el ancho y la profundidad. La Figura 3.4 contiene el radagrama del Perfil 4, es el más largo y atraviesa longitudinalmente el área de estudio, se detectaron posibles muros riostras e información adicional sobre la cimentación.

La Figura 3.5 muestra el Perfil 8, el radagrama de este perfil transversal muestra resultados muy similares a los demás perfiles transversales, por lo que se considera representativo. Contiene información sobre elementos de cimentación de los muros del pasillo. Los demás perfiles que le son análogos contienen resultados similares.

### Capítulo 3. Casos de estudio

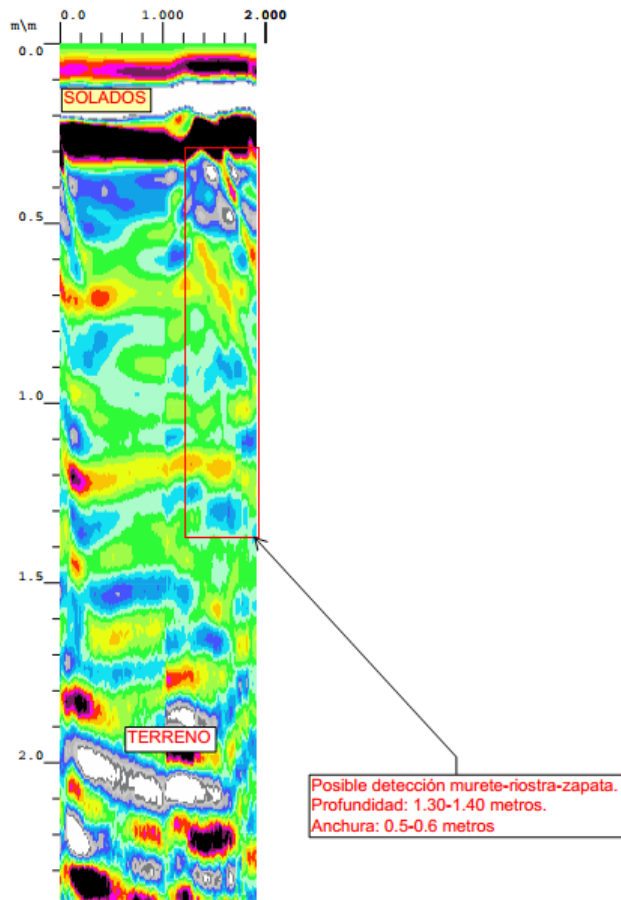


**Figura 3.3.** Plano de la planta baja del edificio ubicado en la Calle Nápoles. Las flechas indican la dirección de los perfiles y las anotaciones en color rojo, las detecciones de cada perfil (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).



**Figura 3.4.** Radagrama del Perfil 4 muestra el área de estudio longitudinalmente (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).



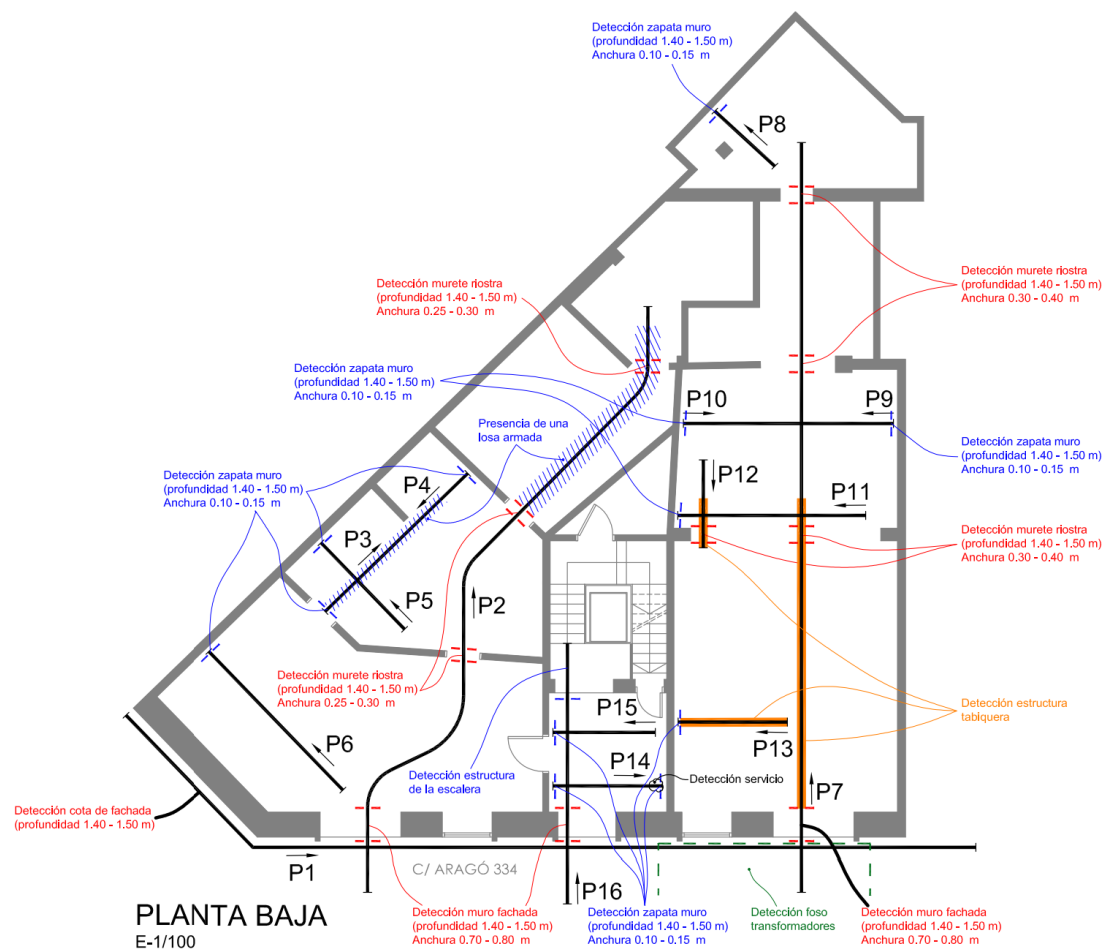


**Figura 3.5.** Radagrama del Perfil 8, muestra una sección transversal del área de estudio. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).

### 3.3. EDIFICIO EN CALLE ARAGÓN, BARCELONA.

Este estudio fue realizado el 4 de mayo de 2015 por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC con el objetivo de conocer la cimentación de un edificio ubicado en la Calle Aragón, que es una de las principales calles del Distrito del Eixample. El edificio bajo estudio se encontraba ocupado por un restaurante en la planta baja en el momento del estudio. Otra singularidad del edificio es que es un edificio de esquina o en el caso del Eixample, un chaflán. Tiene cinco plantas y de toda la planta baja se obtuvieron 16 perfiles.

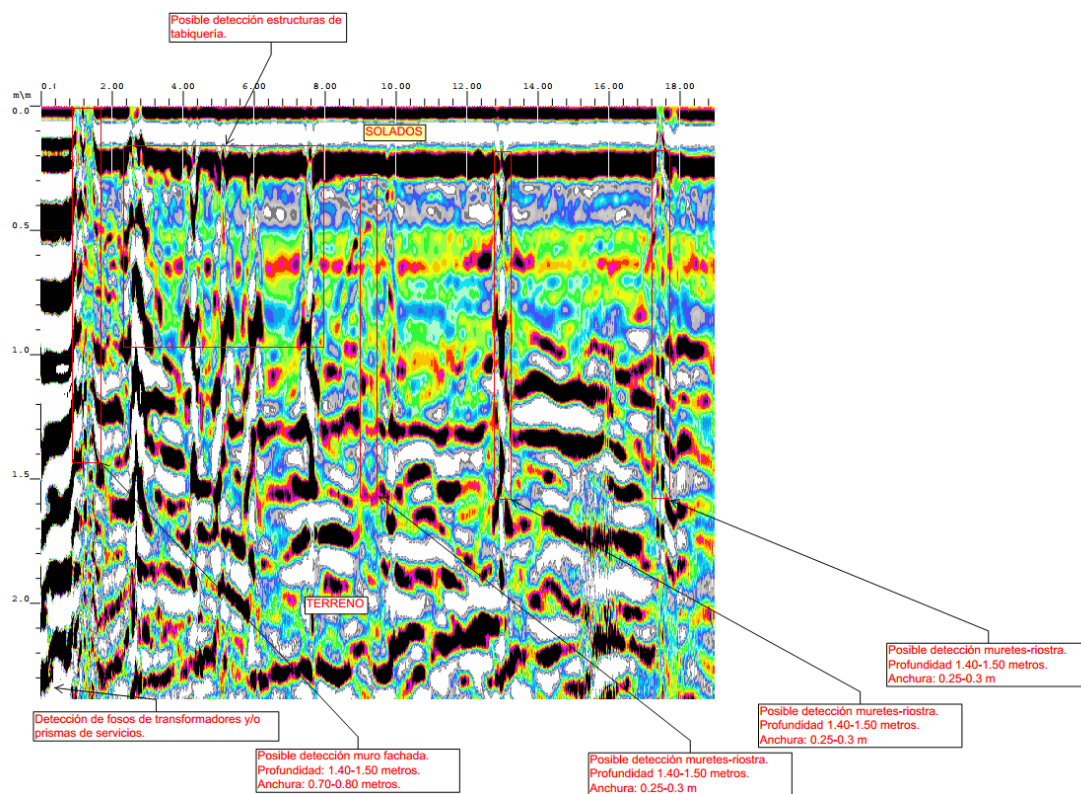
En la Figura 3.6 se puede observar el plano de la planta baja del edificio bajo estudio. Las detecciones de zapatas de muro y de una losa armada se encuentran anotadas en color azul, las detecciones de murete riostra en color rojo, en color verde información adicional a la cimentación: detección de un foso de transformadores, también se detectaron estructuras de tabiquería que se anotan en color amarillo.



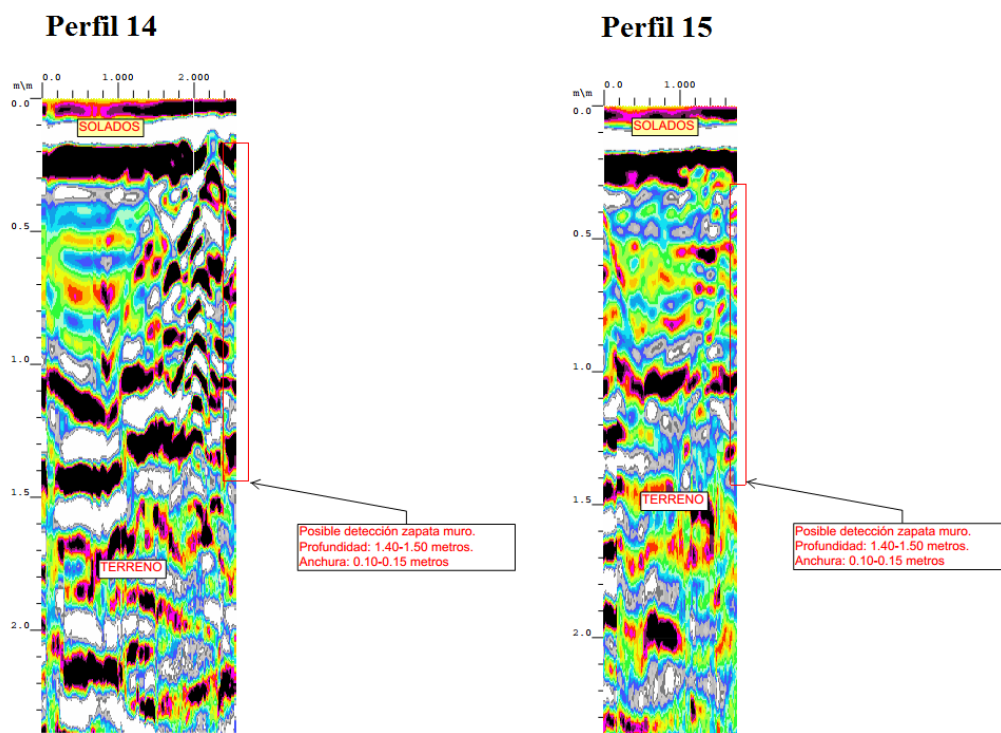
**Figura 3.6.** Plano de la planta baja del edificio ubicado en la calle Aragón. El plano incluye la dirección de los perfiles y los resultados más importantes de estas exploraciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

Se distinguen tres tipos de estructuras de cimentación recurrentes: murete riostra (en el interior) con un ancho típico de 25 a 30 centímetros aproximadamente, zapata de muros interiores de 10 a 15 centímetros de ancho y estructuras de tabiquería. Por eso se han escogido para presentar los radagramas que mejor representan estos casos generales. En la Figura 3.7 se observa el radagrama que corresponde con el Perfil 7, donde se detectó la estructura de tabiquería y murete riostra. En la Figura 3.8 se muestra el radagrama de los perfiles 14 y 15 donde se observan las detecciones de zapata de muro. La Figura 3.9 contiene el radagrama del Perfil 2 que además de contener la detección del muro de fachada (de 70 a 80 centímetros de ancho), también se detectó la presencia de una losa armada.

La profundidad de cimentación es aproximadamente entre 1.40 y 1.50 metros. Entre la información adicional que se extrae de las detecciones en este edificio se encuentran: servicios, foso de transformadores, estructura de tabiquería y la presencia de una losa armada.

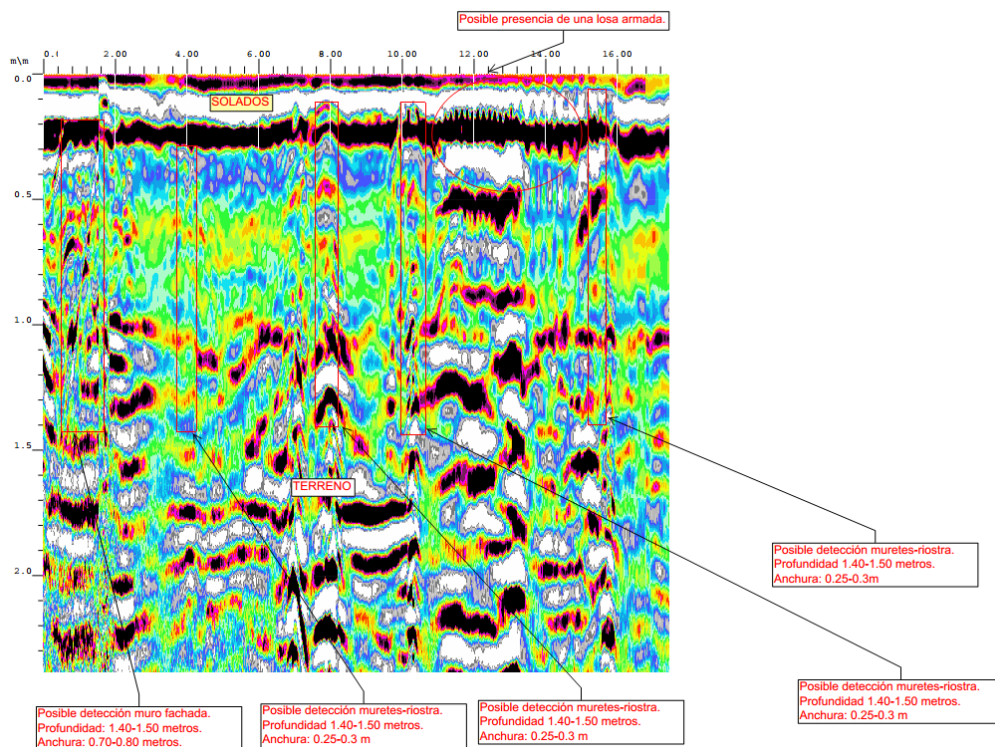


**Figura 3.7.** Radagrama del Perfil 7 del edificio ubicado en la calle Aragón y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).



**Figura 3.8.** Radagramas de los Perfiles 14 y 15 y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).



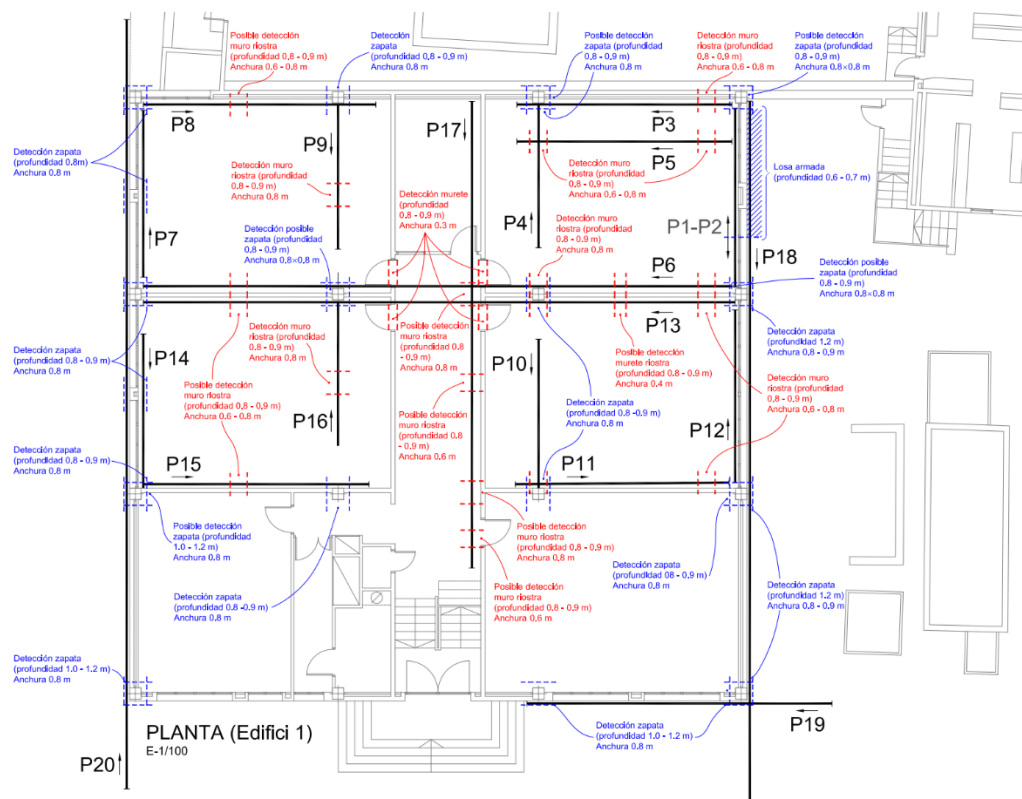


**Figura 3.9.** Radagrama del Perfil 2 y posibles detecciones del edificio ubicado en la calle Aragón. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

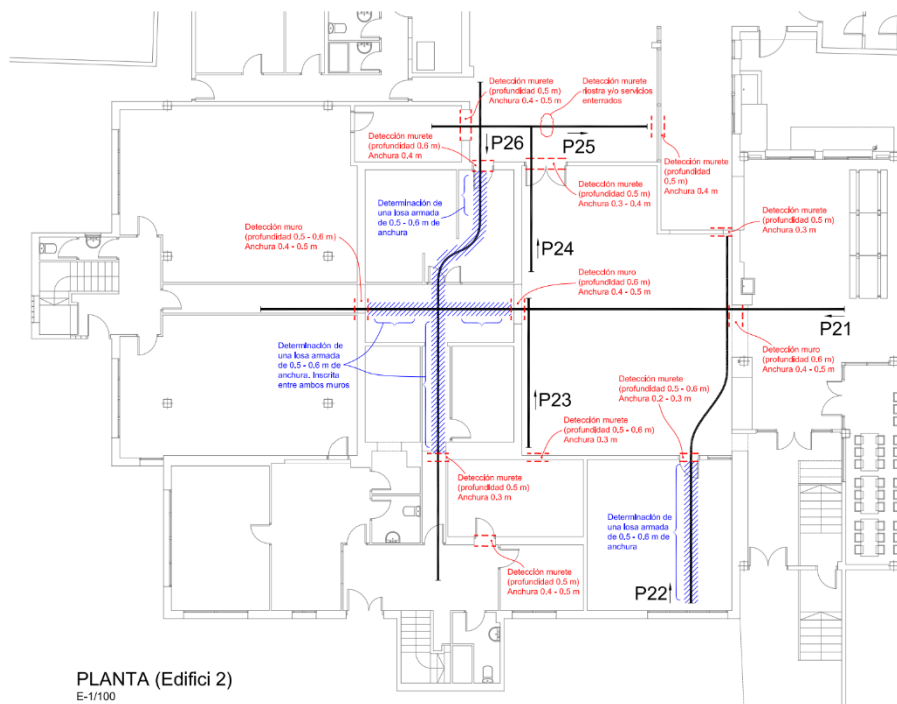
### 3.4. ESCUELA BON SOLEIL DE GAVÁ, BARCELONA

Este estudio se realizó el 26 de febrero de 2015 por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC con el objetivo de conocer la cimentación de dos edificios de la escuela Bon Soleil de Gavá en el municipio del mismo nombre. La escuela se encontraba ocupada y en funcionamiento en el momento de la exploración. La Figura 3.10 contiene el plano de la planta baja del Edificio 1 con las detecciones encontradas en los 20 perfiles realizados (del Perfil 1 al Perfil 20), la mayoría de las detecciones corresponden con muro riostra y zapatas aisladas. La Figura 3.11 contiene el plano de la planta baja del Edificio 2 con las detecciones encontradas en los 6 perfiles realizados (del Perfil 21 al 26).

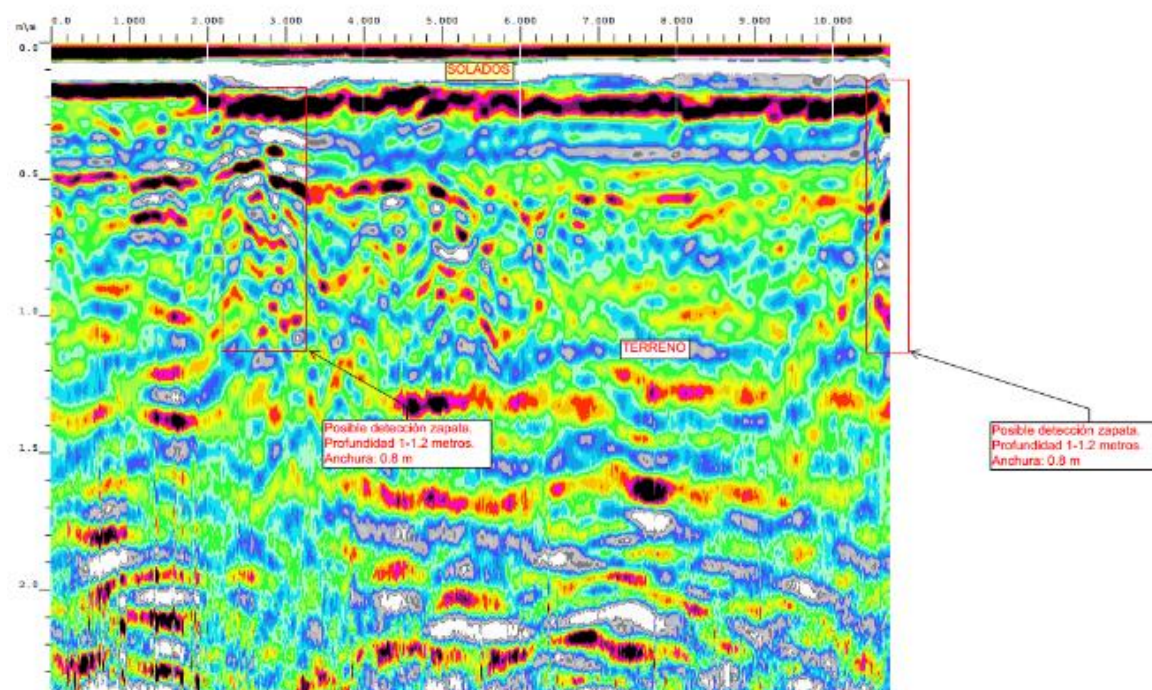
En la Figura 3.12 se observa el radagrama del Perfil 19 de más de 10 metros de longitud ubicado en el Edificio 1 de la escuela, entre todas las detecciones la más importante corresponde a las zapatas aisladas. En la Figura 3.13 se muestra el radagrama del Perfil 17, de más de 16 metros de largo y realizado en el Edificio 1. En este perfil se detectaron varios murete riostra de 80 centímetros de ancho y uno de 60 centímetros de ancho. La Figura 3.14 muestra el radagrama del Perfil 26 ubicado en el Edificio 2, se considera importante por la posible detección de una losa armada. En general, la profundidad de la cimentación ronda los 80 ó 90 centímetros y los perfiles escogidos son representativos de todos los perfiles.



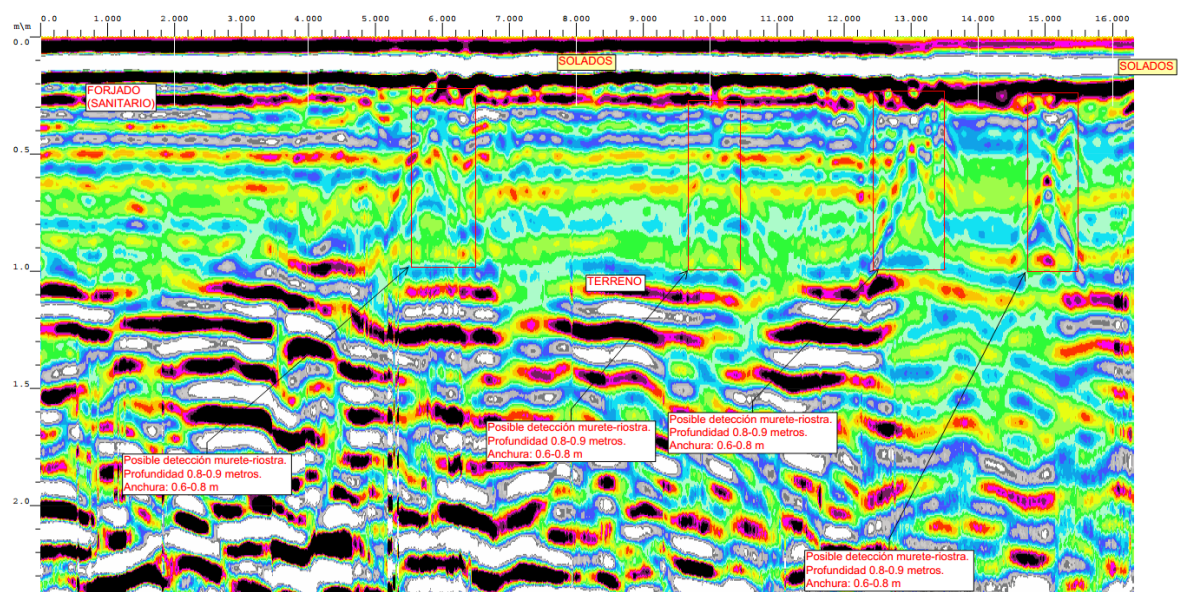
**Figura 3.10.** Planta baja del edificio 1 de la Escuela Bon Soleil de Gavá, se muestra la dirección de los 20 perfiles realizados y las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).



**Figura 3.11.** Planta baja del edificio 2 de la Escuela Bon Soleil de Gavá. Se muestra la dirección de los 6 perfiles realizados y las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015)



**Figura 3.13.** Radagrama del Perfil 19 perteneciente al Edificio 1 de la Escuela Bon Soleil de Gavá (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).



**Figura 3.12.** Radagrama del Perfil 17 correspondiente al Edificio 1 de la Escuela Bon Soleil de Gavá (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).



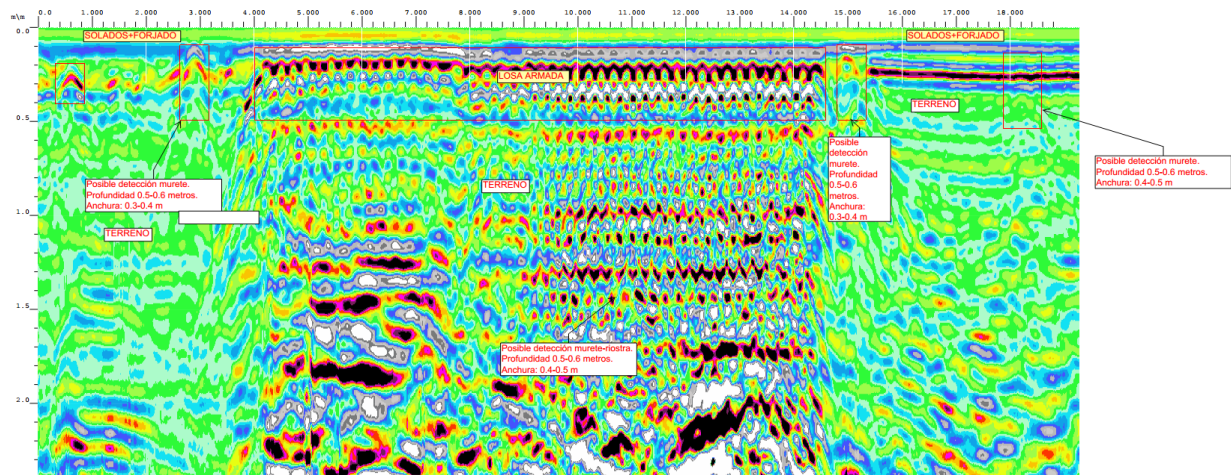


Figura 3.14. Radagrama del Perfil 26 realizado en el Edificio 2 de la Escuela Bon Soleil de Gavá (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

### 3.5. EDIFICIO EN CALLE TAFALLA, PAMPLONA

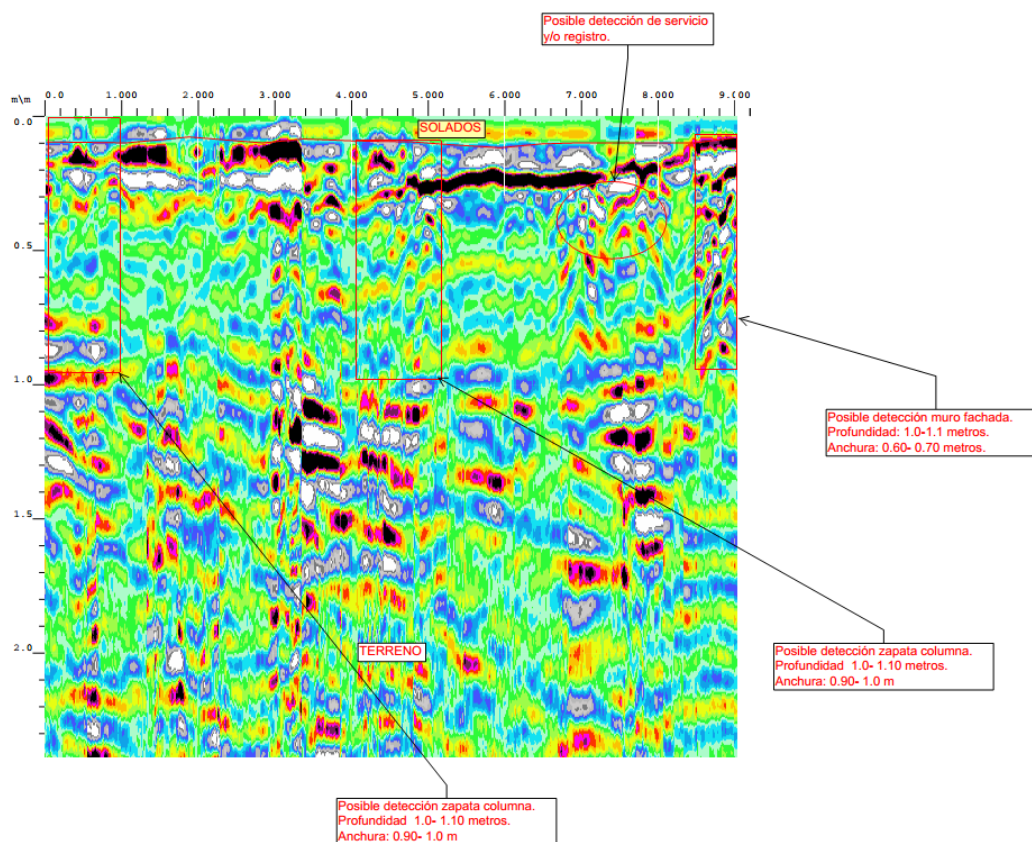


Figura 3.15. Edificio en la calle Tafalla en la ciudad de Pamplona. a) y b) muestran el estado del sótano donde se realizaron las prospecciones. c) imagen de la fachada del edificio (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014) y d) ubicación geográfica de la manzana donde se encuentra el edificio (Google Maps, 2016).

El estudio del Edificio en la calle Tafalla de la ciudad de Pamplona fue hecho el 22 de enero de 2016 por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC con el objetivo de conocer la cimentación. Este edificio presenta la particularidad de tener una planta de sótano, donde se realizaron las prospecciones. La Figura 3.15 muestra el estado de las dependencias del edificio, imagen de la fachada y su ubicación geográfica porque no se encuentra incluida en la Figura 3.1 que sólo contiene los edificios de Cataluña.

En este estudio se realizaron 23 perfiles en total en el sótano del edificio cuyo plano se puede observar en la Figura 3.17 además de la dirección de los perfiles y las posibles detecciones. En este caso se han detectado principalmente: muros, murete riostra y zapata de columna como elementos de cimentación y como información adicional reflexiones en los radagramas asociados a la presencia de oquedades (sótano) y/o pozos, colectores y/o humedades.

Se han escogido como muestra representativa de todos los perfiles: el Perfil 10 donde se tiene la posible detección de zapata de columna, servicios o registros y muro de fachada (Figura 3.16) y el Perfil 20 donde se detecta la posible presencia de un sótano o servicios enterrados (Figura 3.18). La profundidad de cimentación es variable en toda la planta del edificio. Para los muros interiores es de aproximadamente 50 centímetros, algunos muros de fachada tienen 2.40 metros de profundidades y otros 1 metro. La cota de fachada (hacia la calle Tafalla) se estableció en 2.40 metros aproximadamente.

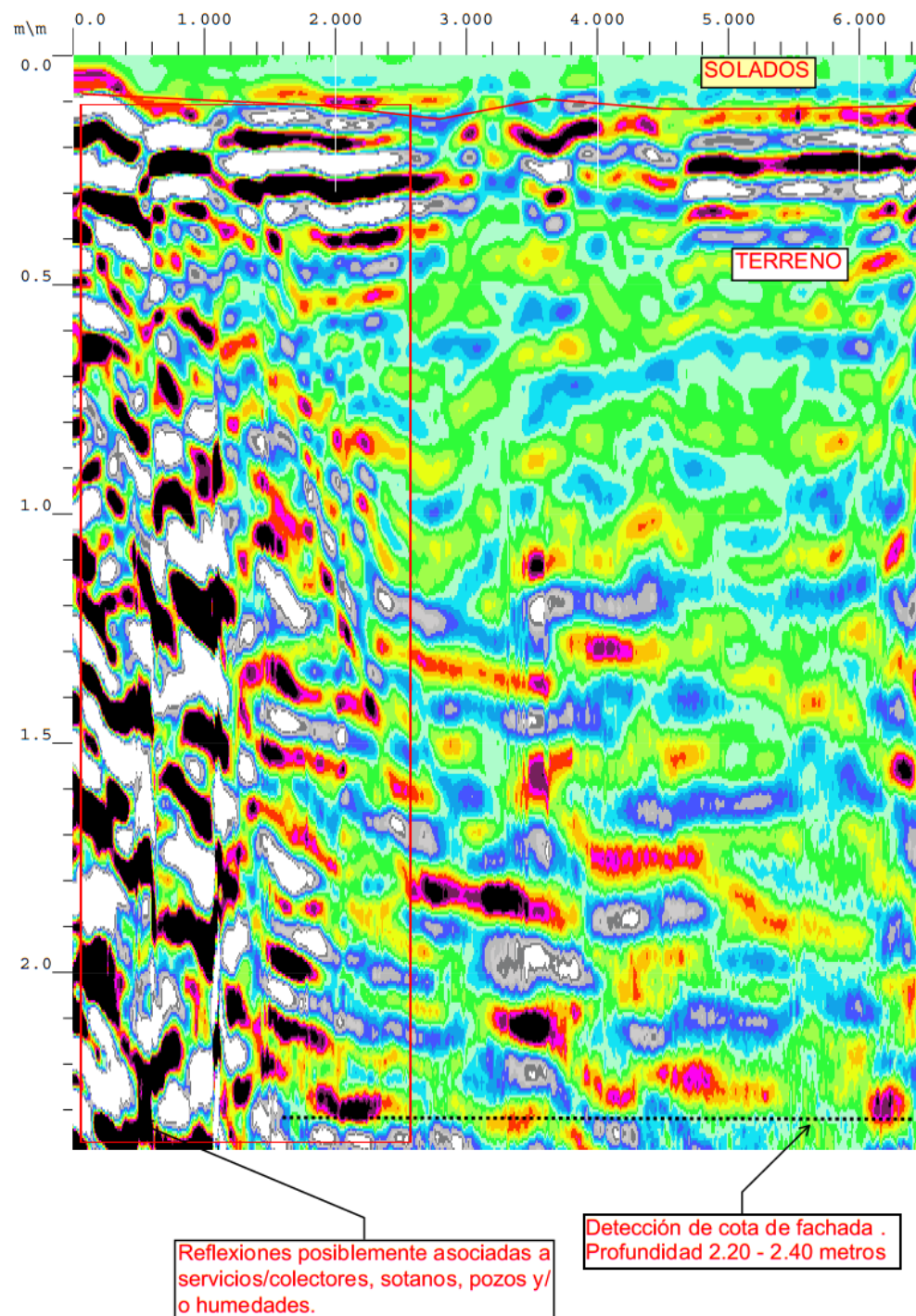


**Figura 3.16.** Radagrama correspondiente al Perfil 10 del edificio ubicado en la calle Tafalla, Pamplona (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014).



49





**Figura 3.18.** Radagrama correspondiente al Perfil 20 del edificio ubicado en la calle Tafalla, Pamplona (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2014).



### 3.6. EDIFICIO EN GRAN VÍA DE LES CORTS CATALANES, BARCELONA

El 22 de julio de 2016 se realizó el estudio para conocer la cimentación de un edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes en Barcelona. El estudio fue realizado por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. Este edificio se encontraba ocupado en su planta baja en el momento de la exploración como se muestra en la Figura 3.19. Se realizaron 21 perfiles: 20 de ellos en la planta baja (Figura 3.20) y un perfil en la planta del sótano (Figura 3.21). Ambos planos contienen la dirección de los perfiles y las posibles detecciones.

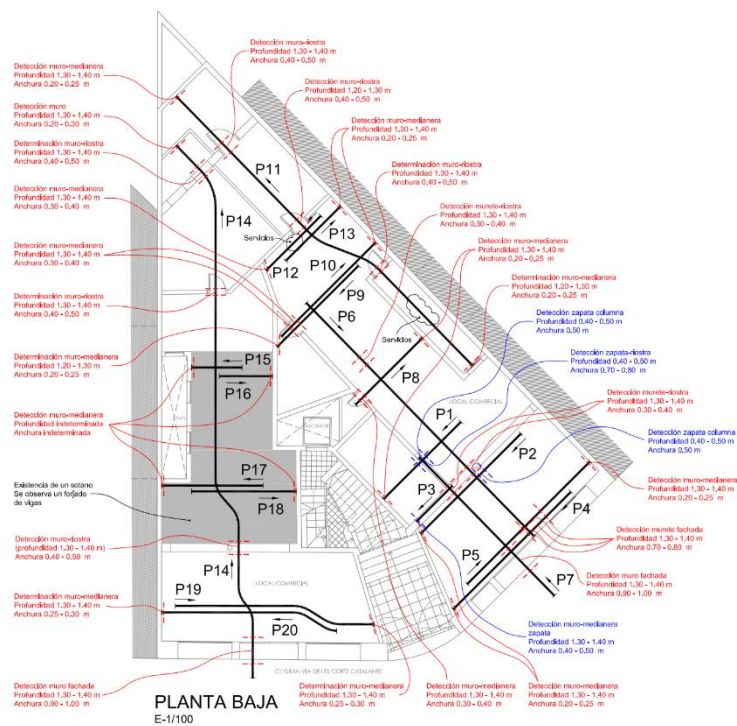


**Figura 3.19.** Estado de las dependencias del edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes en el momento de la exploración (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).

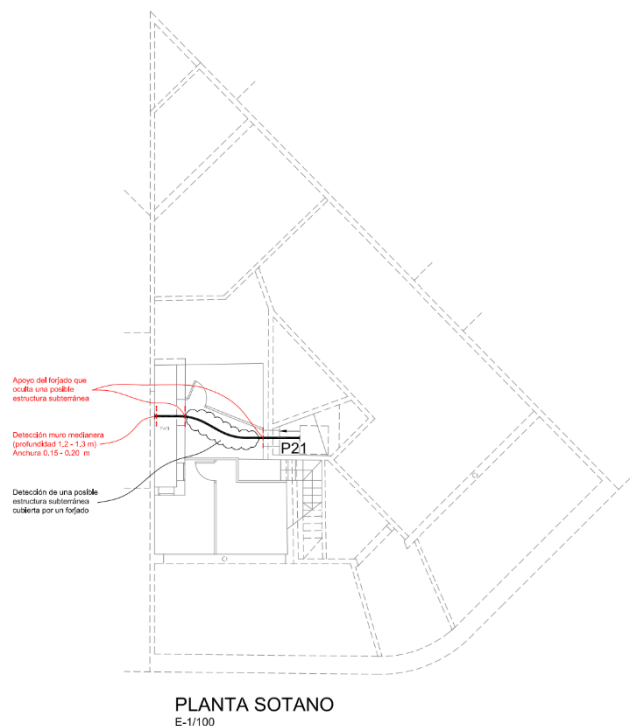
En este edificio las detecciones más importantes en relación a los elementos estructurales y de cimentación son: Muros de fachada con un espesor de 0.9 a 1.0 m, muros de medianería de 20 a 25 centímetros de ancho, zapatas de columna de 50 centímetros de ancho, murete riostra con espesores de 30 a 40 centímetros y zapatas de riostra de 70 u 80 centímetros de ancho. En todos los casos la profundidad de cimentación se encuentra entre 1.20 y 1.40 metros.

Una particularidad encontrada como información adicional a la cimentación es la existencia de un sótano, donde se observa un forjado de vigas. Se escogieron los perfiles que representan los casos de cimentación antes mencionado, estos son: el Perfil 21 (Figura 3.22) donde en el sótano de la estructura se detecta una posible estructura subterránea cubierta por un forjado, además de un apoyo del mismo forjado que oculta una posible estructura subterránea. La Figura 3.23 muestra el radagrama del Perfil 11 realizado en la planta baja, se detecta la posible existencia de muros riostras y zapatas aisladas (medianeras). El radagrama del Perfil 2 (Figura 3.24) muestra la posible detección de una zapata de columna y como información adicional la presencia de reflexiones posiblemente asociadas a colectores y/o la presencia de humedad. Estos son, en resumen los casos más generales encontrados entre los 21 perfiles realizados.

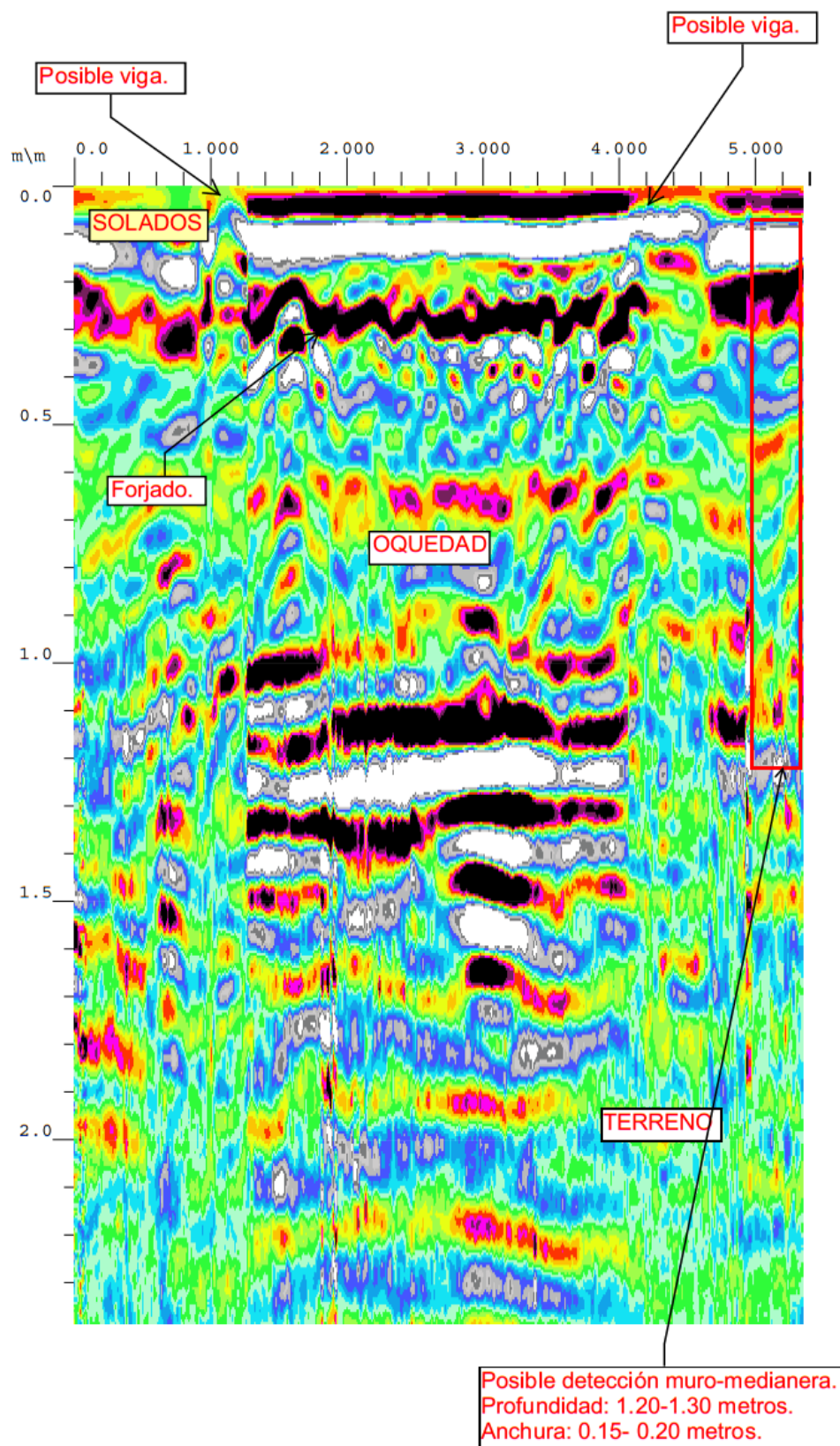
## Capítulo 3. Casos de estudio



**Figura 3.20.** Plano de la Planta Baja del edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes, Barcelona. Contiene la dirección y detección de los 20 perfiles que se realizaron en esta planta (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).

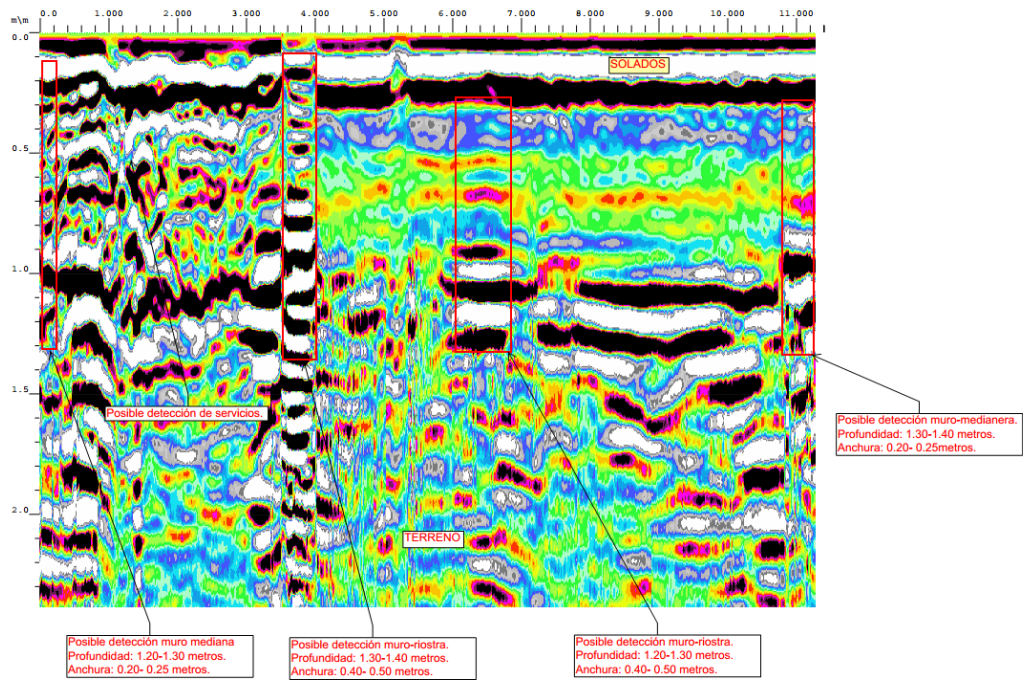


**Figura 3.21.** Plano del sótano del edificio ubicado en la Gran Vía de les Corts Catalanes con el único perfil realizado y las detecciones del mismo (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).

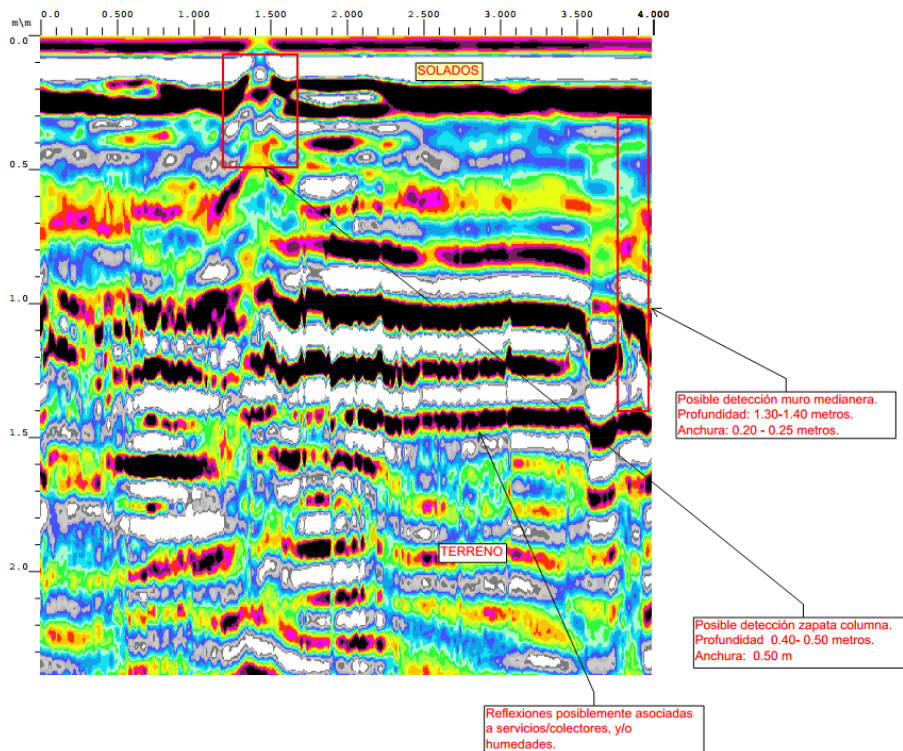


**Figura 3.22.** Radagrama que corresponde al Perfil 21 con las notas de las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).





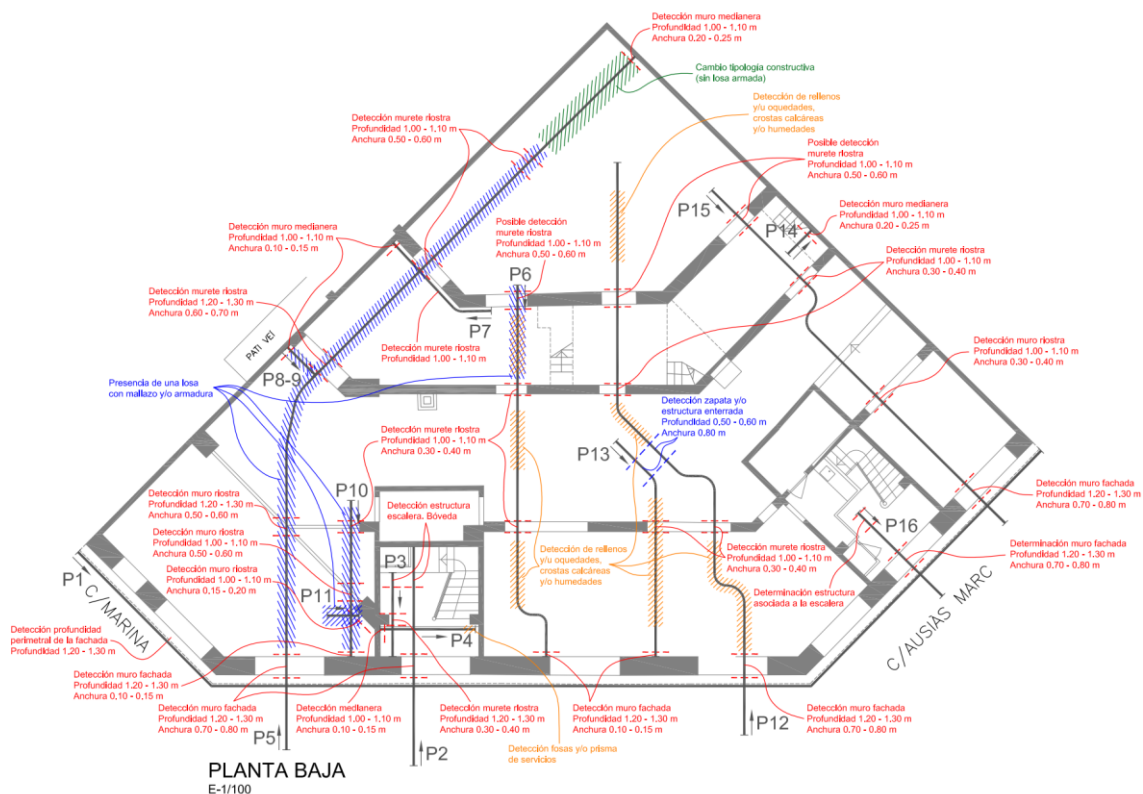
**Figura 3.23.** Radagrama del Perfil 11 ubicado en la Planta Baja del edificio y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).



**Figura 3.24.** Radagrama obtenido del Perfil 2 ubicado en la Planta Baja y posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2016).

### 3.7. EDIFICIO EN CALLE MARINA, BARCELONA

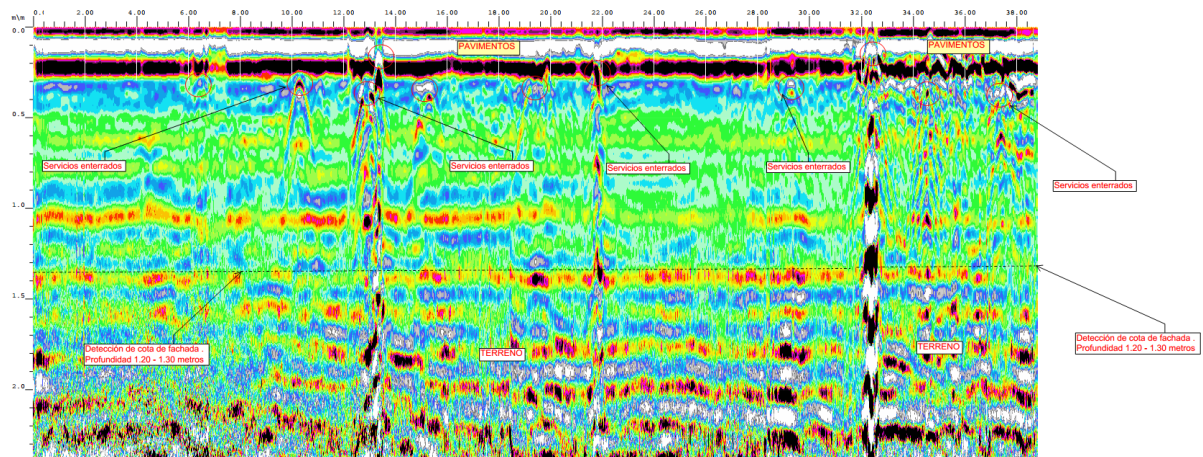
En el edificio ubicado en la calle Marina de la ciudad de Barcelona se realizó un estudio el 16 de octubre de 2015 por el Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC con el fin de conocer la cimentación de este edificio de 5 niveles. Cabe destacar que este es un edificio de esquina (chaflán) ubicado en el Distrito del Eixample. Se realizaron 16 perfiles en la planta baja del edificio, en la Figura 3.25 se puede observar la dirección de los perfiles y las detecciones sobre el plano de la planta baja del edificio.



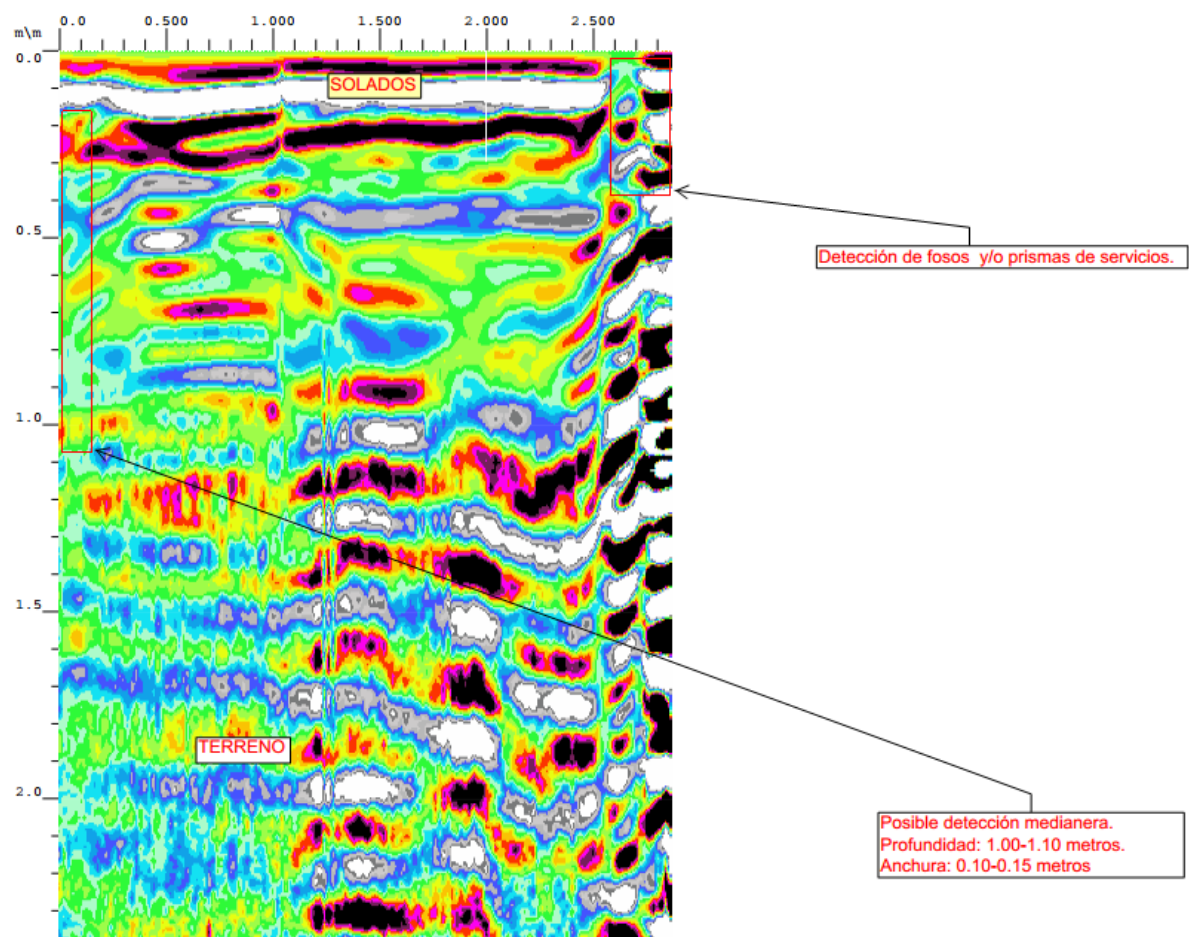
**Figura 3.25.** Planta baja del edificio ubicado en la calle Marina, Barcelona. Sobre el plano se observan los 16 perfiles realizados con su dirección y detecciones. (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

En este edificio se presentaron casos muy diversos distribuidos por toda la planta, no sólo elementos de cimentación, sino también información adicional sobre elementos constructivos o singularidades geológicas. Se formaron grupos con los casos donde las posibles detecciones eran similares y se escogió un perfil que representa cada caso.

- Perfil 1: detección de muro de fachada (Figura 3.26).
- Perfil 4: detección de medianera. Fosas y/o prisma de servicios (Figura 3.27).
- Perfil 12: detección de zapata y/o estructura enterrada. Rellenos y/u oquedades, costras calcáreas y/o humedades (Figura 3.28).
- Perfil 5: presencia de una losa con mallazo o armada. Cambio de tipología constructiva donde no figura la losa armada (Figura 3.29).

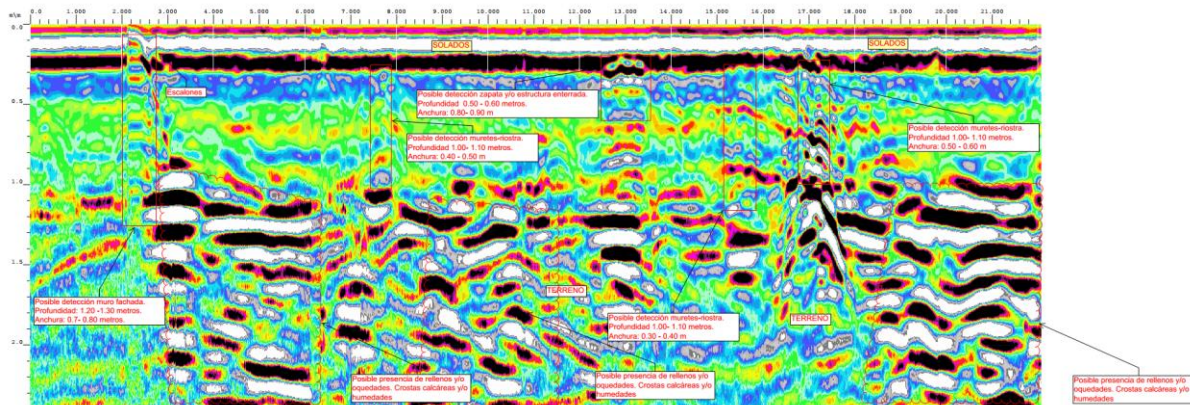


**Figura 3.26.** Radagrama del Perfil 1 donde se muestran las detecciones encontradas (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

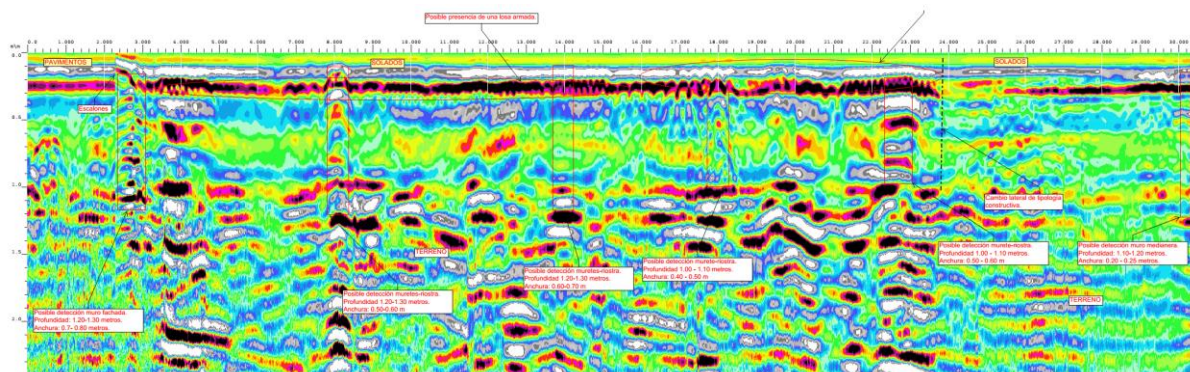


**Figura 3.27.** Radagrama correspondiente al Perfil 4 y las detecciones de esta prospección (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).





**Figura 3.28.** Radagrama correspondiente al Perfil 12 con 22 metros de longitud muestra las posibles detecciones (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).



**Figura 3.29.** Radagrama correspondiente al Perfil 5, de más de 30 metros de longitud (Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC, 2015).

En el Perfil 1 destaca la detección de servicios además de la localización de la cota de fachada de 1.20 a 1.30 metros de profundidad. El Perfil 4 muestra la posible presencia de una zapata medianera de 10 a 15 centímetros de ancho, además de un foso y/o prisma de servicios.

El Perfil 12 muestra la posible presencia de rellenos u oquedades además, de la detección de zapata o estructura enterrada a poca profundidad (50 ó 60 centímetros). El Perfil 5 muestra, mayormente posibles detecciones de muretes riostras y como caso particular de esta zona la presencia de una losa armada y el punto donde hay un cambio de tipología estructural (no se detecta la presencia de la losa armada).

La profundidad de las cimentación, en general se encuentra de 1 a 1.10 metros para algunas riostras y medianeras, mientras que se encontraron profundidades de 1.20 a 1.30 metros para riostras y los muros de fachada.



## CAPÍTULO 4. MODELO A ESCALA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

## 4.1. MODELO A ESCALA

El modelo a escala de una cimentación de mampostería es útil para calibrar los resultados que se han obtenido en campo mediante estudios de casos reales. Para esto se eligieron las configuraciones que más probablemente se encuentren en la cimentación de edificios de mampostería. En este apartado se dan los criterios utilizados para la realización del modelo y los resultados obtenidos.

El material elegido para realizar el modelo a escala de la cimentación fue ladrillo refractario de  $3 \times 11 \times 22$  centímetros ubicados de forma estratégica en un contenedor de madera con unas dimensiones de  $80 \times 30 \times 45$  centímetros (largo, ancho y profundidad, ver Figura 4.2) y como relleno y soporte se utilizó suelo del llano de Barcelona. Las características granulométricas de este suelo se pueden observar en la Figura 4.1.

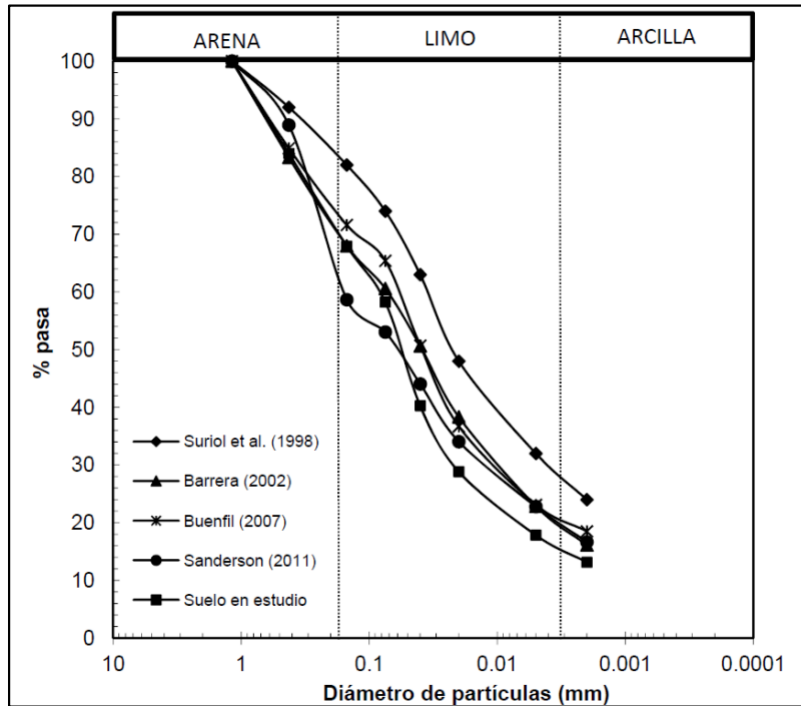
El relleno utilizado es, más concretamente *arcilla del llano de Barcelona*, es un tipo de material muy común en la ciudad y empleado en diversos estudios en el Departamento de Geotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña. En el año 2014 Hernández Arciniega realizó una tesis de máster utilizando este tipo de suelo. Aunque los detalles de este estudio no son relevantes, lo son las características y origen del suelo empleado también en este trabajo:

“Este suelo pertenece a los sedimentos pleistocenos (cuaternarios) que reposan sobre un substrato rocoso formado por el macizo paleozoico pizarroso o granítico, o por los sedimentos neógenos del Mioceno y del Pleistoceno... Estos sedimentos tienen su origen en conos de deyección procedentes de los relieves montañosos adyacentes al llano de Barcelona. Los conos se habrían originado bajo un régimen pluviométrico torrencial, en un clima cálido y húmedo.

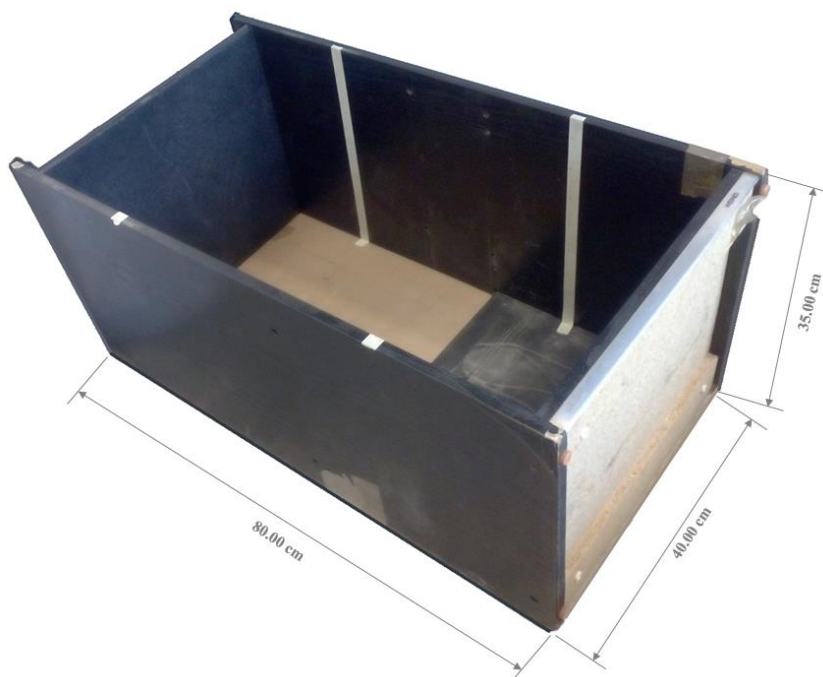
Las arcillas procedentes de la alteración del substrato, corresponderían a coladas de barro y se intercalarían con los depósitos torrenciales más detríticos. Es probable que los limos sean en parte eólicos, y tendrán su origen en un medio frío y seco. Se considera que viene de la deflación del viento sobre una zona fangosa y reseca del litoral, en momentos en que el nivel del mar era más bajo. Por sus características se puede decir que el suelo empleado corresponde a la arcilla roja compacta”

La primera capa de relleno tiene un espesor de 10 centímetros, sobre esta capa se colocaron los ladrillos refractarios para simular una cimentación del tipo que suelen encontrarse en los trabajos de campo (Véase el tema sobre los casos de estudio). Para los detalles sobre la posición de los ladrillos se puede consultar la Figura 4.3. Luego de colocar los ladrillos, se enrasó con una capa de suelo de 3 centímetros de espesor. Sobre todo lo anterior se colocó una capa de concreto de 1,5 centímetros de espesor para simular el solado de la estructura y tener una capa de rodamiento para la antena del radar.

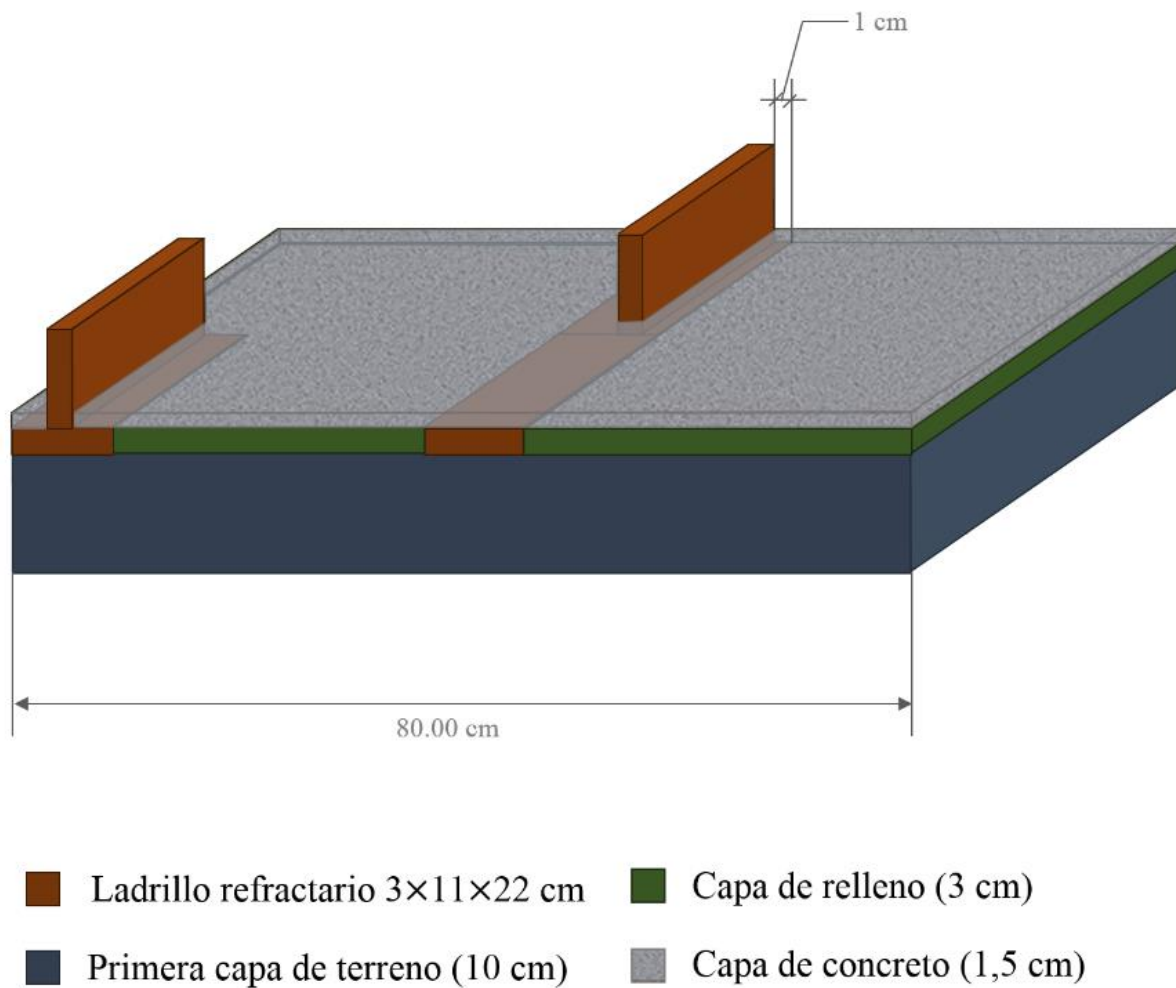
El tamaño de las distintas capas del modelo es aproximadamente una décima parte de las dimensiones reales de modo que los resultados obtenidos se han utilizado para ser comparados con los casos de estudio.



**Figura 4.1.** Curva granulométrica del de la arcilla roja del llano de Barcelona (Hernández Arciniega, 2014).



**Figura 4.2.** Contenedor del modelo a escala con sus dimensiones.



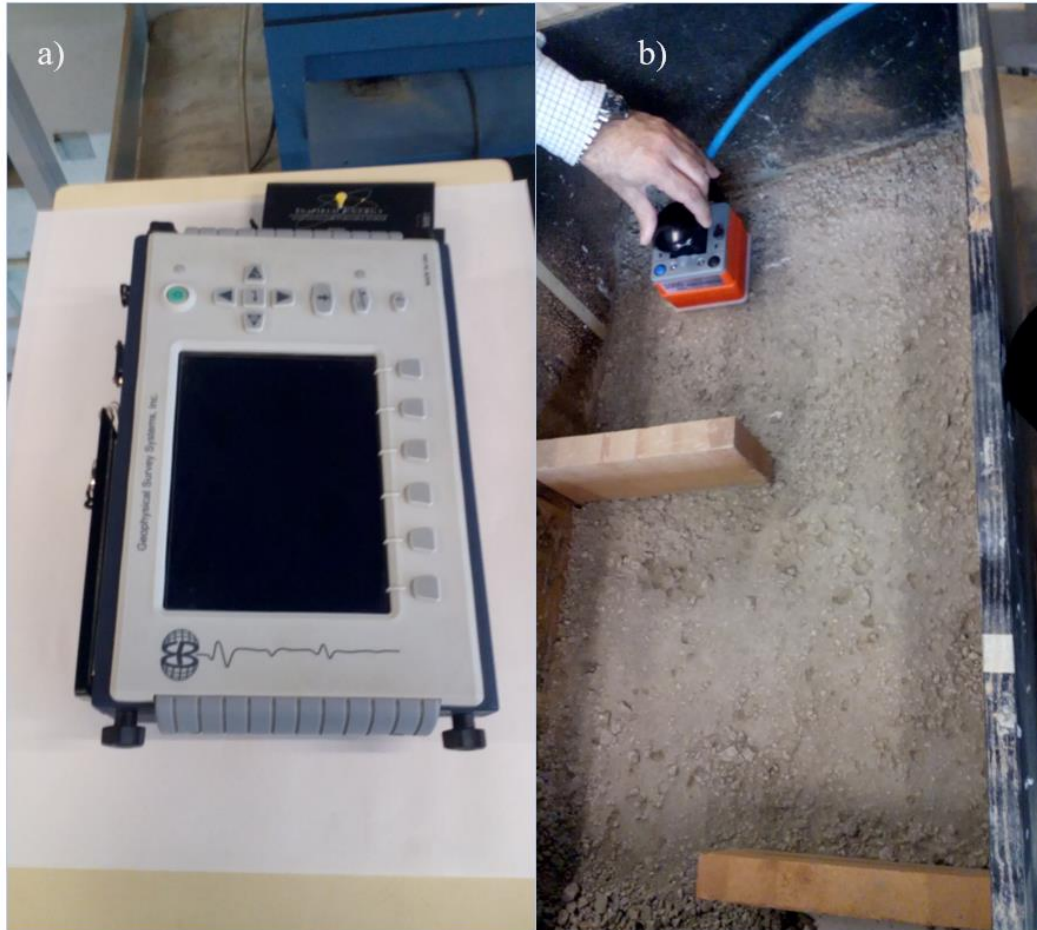
**Figura 4.3.** Representación gráfica del modelo a escala con la distribución de las capas y ubicación de los ladrillos. El dibujo es esquemático y no se encuentra a escala.

Para realizar las prospecciones se utilizó una antena de la firma GSSI modelo 62000 de 2000 MHz de frecuencia (Figura 4.4-**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**b) y el sistema digital de georradar de registro continuo SIR-3000 (Figura 4.4-**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**a). No se utilizó la rueda marcadora de distancias por el poco espacio de manejo dentro del modelo. Normalmente para prospecciones de cimentaciones superficiales con una profundidad de unos pocos metros se utiliza una frecuencia de 400 MHz, por tanto, ajustando la escala para el tipo de prospección en el modelo (de unos pocos centímetros) se tiene congruencia con los casos encontrados en la realidad.

Se realizaron dos prospecciones sobre el modelo a escala con el objetivo de obtener radagramas parecidos a los casos más comúnmente encontrados en la realidad y posteriormente compararlos. En la primera prospección del modelo (Figura 4.5) con una longitud de 25 centímetros se puede observar en el radagrama resultante el pie de la cimentación de un muro

de fachada en la parte de fuera o muro de medianería casos donde la cimentación suele ser mucho más pequeña que el grosor del muro.

La segunda prospección, más larga (61 cm) se puede observar en la Figura 4.6 y se corresponde con dos casos diferenciados: Al atravesar un dintel se puede observar la cimentación del muro en todo su ancho y el otro caso es al encontrarse con un muro de carga y se puede observar el pie de la cimentación de dicho muro que suele tener un ancho igual al del muro.

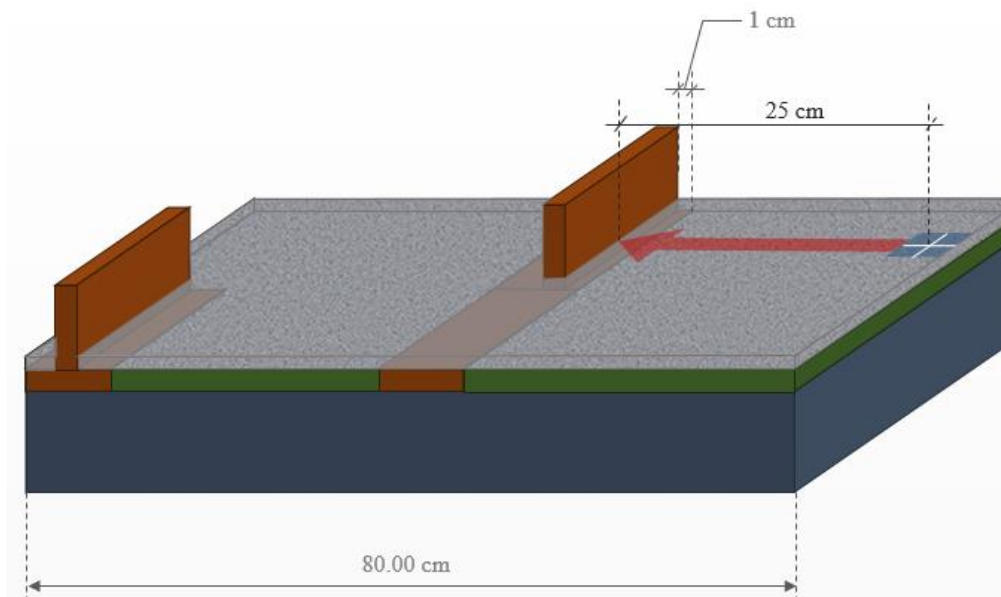
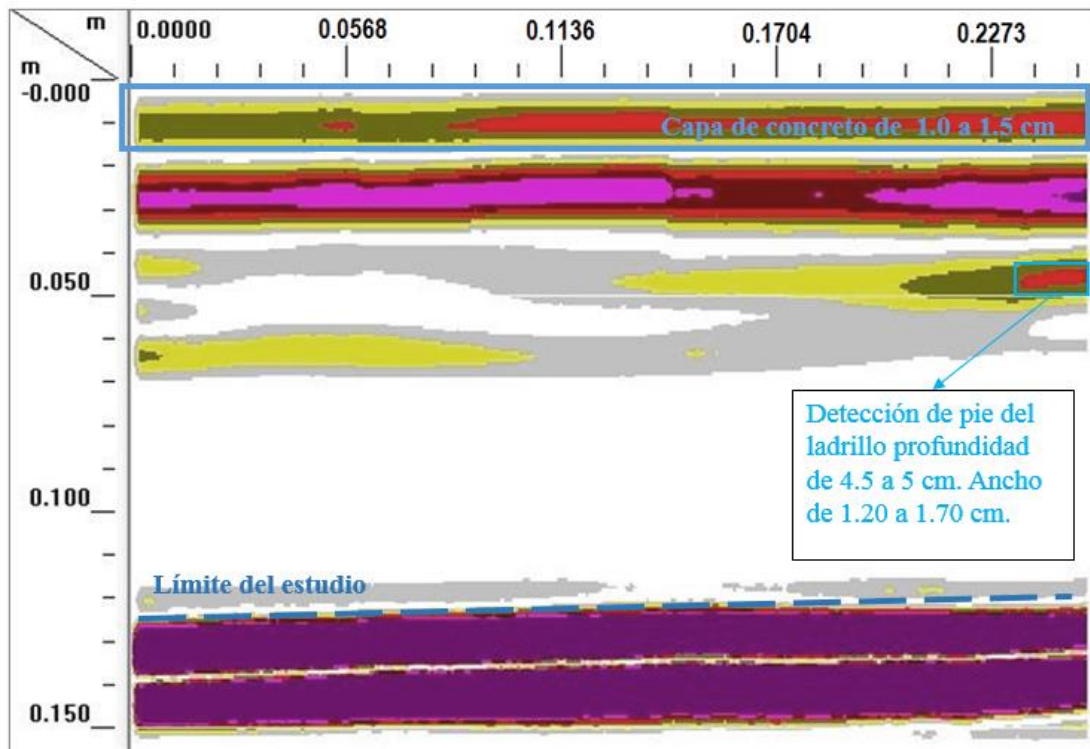


**Figura 4.4.** (a) Sistema digital de georradar de registro continuo SIR-3000 de GSSI (b) Antena de 2000 MHz de frecuencia.

### Procesamiento de datos

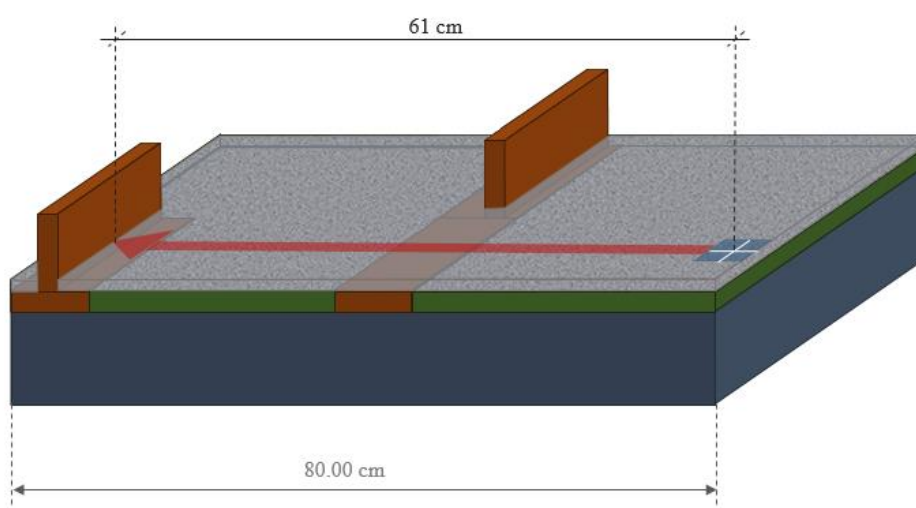
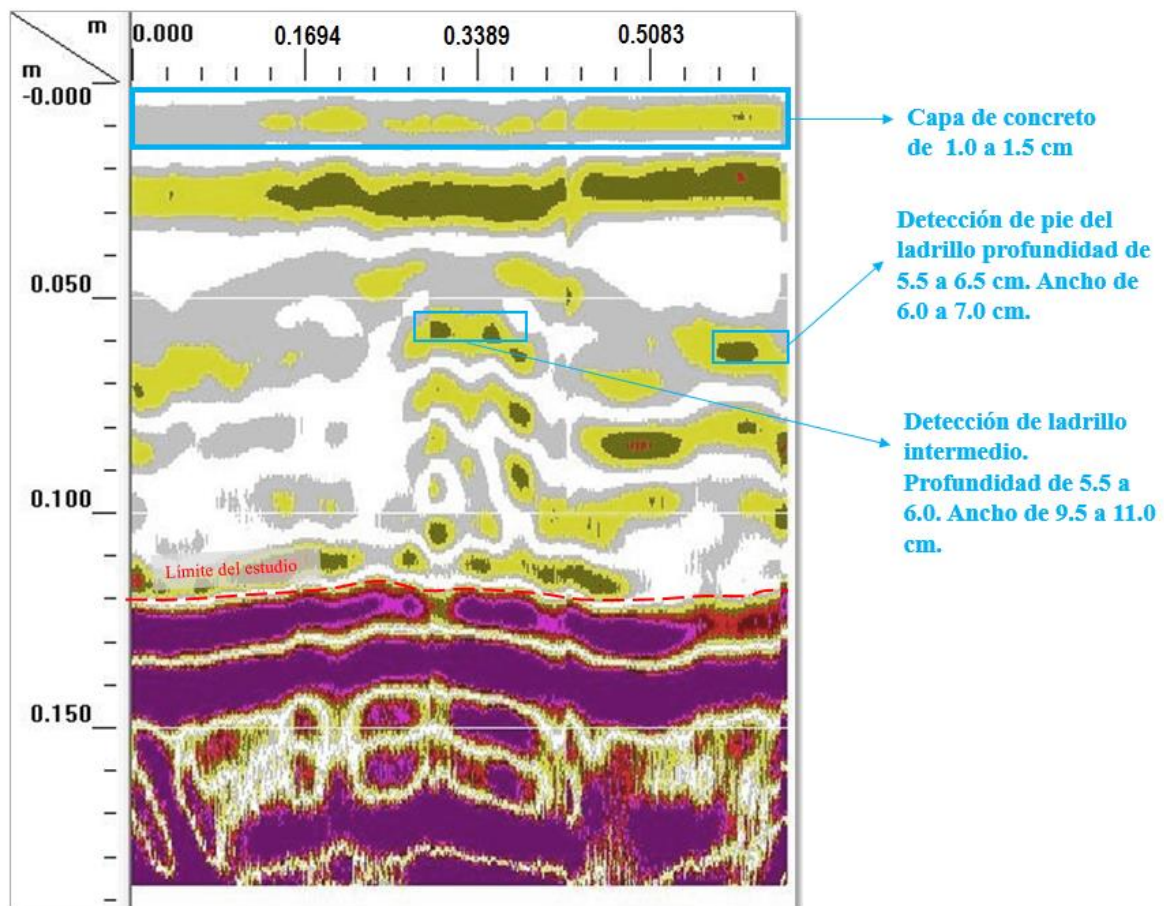
Para el procesamiento de los radagramas del modelo a escala se utilizaron las siguientes técnicas: Infinite Impulse Response (en vertical) ó Respuesta infinita al pulso, este es un filtro digital donde la señal de entrada es un impulso y la salida al tener un número infinito de respuestas nunca vuelve a su estado de reposo.

Los filtros para la frecuencia de 2000 MHz de la antena utilizada son el filtro pasa-baja a 2500 Mhz y filtro pasa-alta a 225 Mhz. Para el modelo se utilizó una constante dielectrica igual a 8.





**Figura 4.5.** Perfil 1, en esta prospección se simula el encuentro frontal con un muro de fachada. El dibujo es un modelo esquemático y no se encuentra a escala.



**Figura 4.6.** Perfil 2. En esta prospección se analizan dos casos: atravesar un dintel y el encuentro con la cimentación de un muro interior.

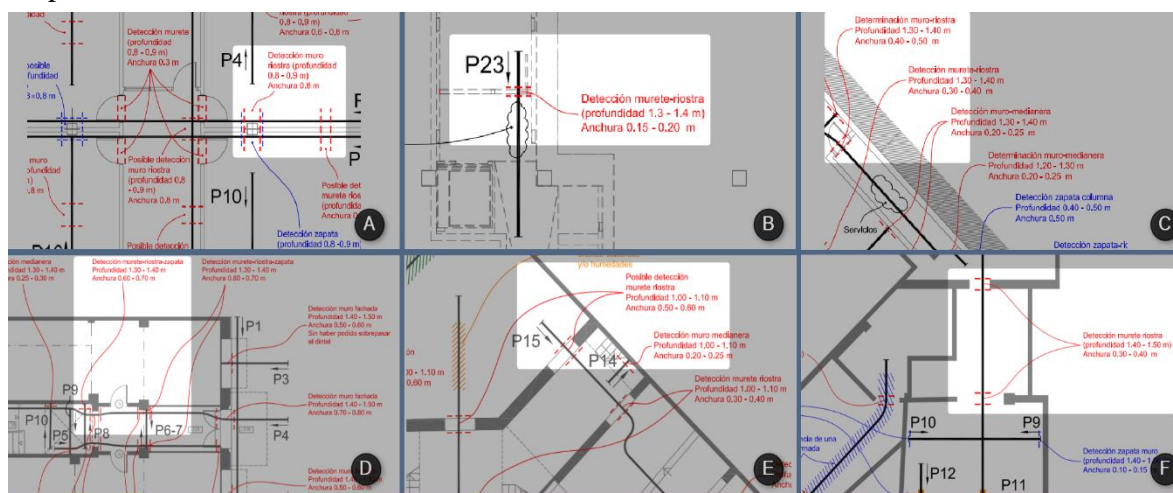


## 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados de comparar los casos reales (presentados en el Capítulo 3) y el modelo a escala. Cabe destacar que en todas las situaciones reales estudiadas, la exploración de cimentaciones en edificios da como resultado unos radagramas complejos de los cuales se interpreta la realidad. Sin embargo, en el modelo a escala tenemos la realidad simplificada que produce unos resultados también sencillos en comparación con la realidad. Una vez aclarado este punto se muestran en este apartado las similitudes que permiten validar el método del georradar para la exploración de cimentaciones.

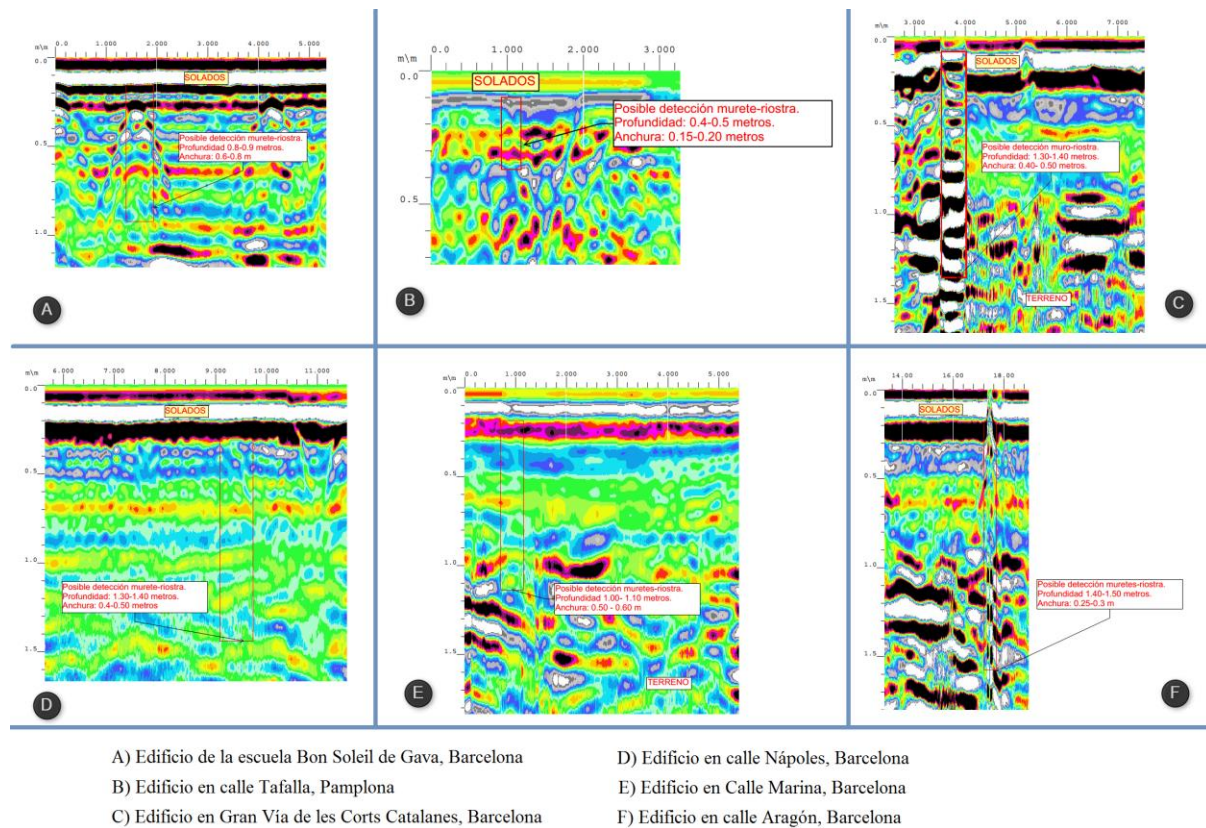
El modelo a escala sirve como forma de calibrar los resultados encontrados en la realidad. Aunque se recomienda la realización de catas y calas para verificar las posibles detecciones no siempre es posible intervenir de esta forma en edificios que muchas veces se encuentran habitados o no poseen espacio libre para un método invasivo como el que se sugiere.

Uno de los casos más comunes en los casos de estudio es encontrar un murete o riostra que se detecta al pasar por los huecos de puertas interiores el muro donde se encuentra inscrita continúa bajo tierra y es posible detectar su espesor junto con la cimentación. En cada caso de estudio donde aparece una detección de riostra (se encontró en los seis casos analizados) se ha tomado un ejemplo, de forma que la Figura 4.7 muestra la parte del plano donde se encuentra este tipo de estructura. En la Figura 4.8 se puede observar el radagrama correspondiente con cada una de las detecciones de riostras mencionadas anteriormente. Estas imágenes serán comparadas con el Perfil 2 del modelo a escala (Figura 4.9) donde se simuló cruzar un dintel de puerta.

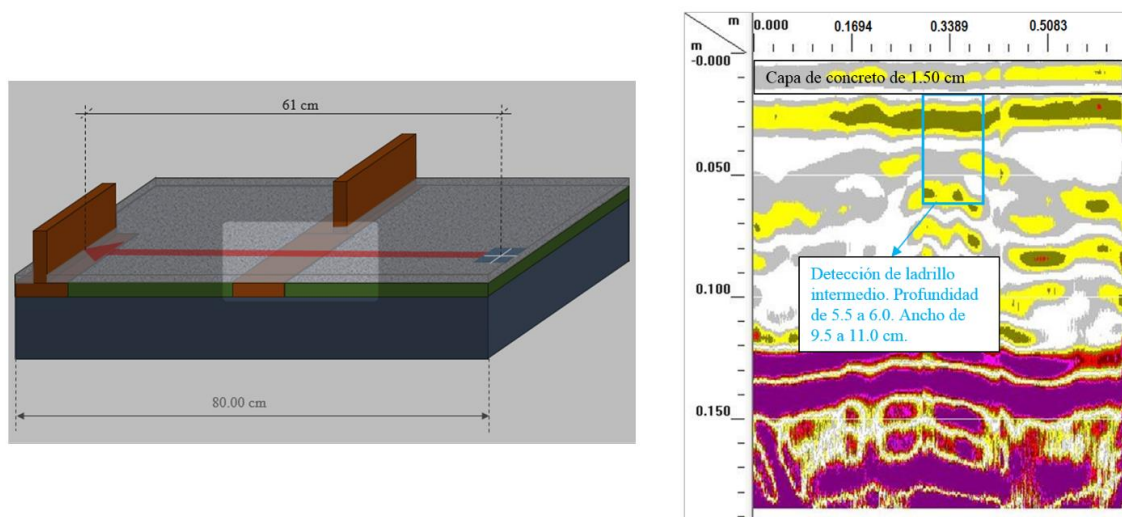


- |   |   |
|---|---|
| A) Edificio de la escuela Bon Soleil de Gava, Barcelona   | D) Edificio en calle Nápoles, Barcelona |
| B) Edificio en calle Tafalla, Pamplona                    | E) Edificio en Calle Marina, Barcelona  |
| C) Edificio en Gran Vía de les Corts Catalanes, Barcelona | F) Edificio en calle Aragón, Barcelona  |

**Figura 4.7.** Parte de los planos donde aparecen los casos de detección de riostras.



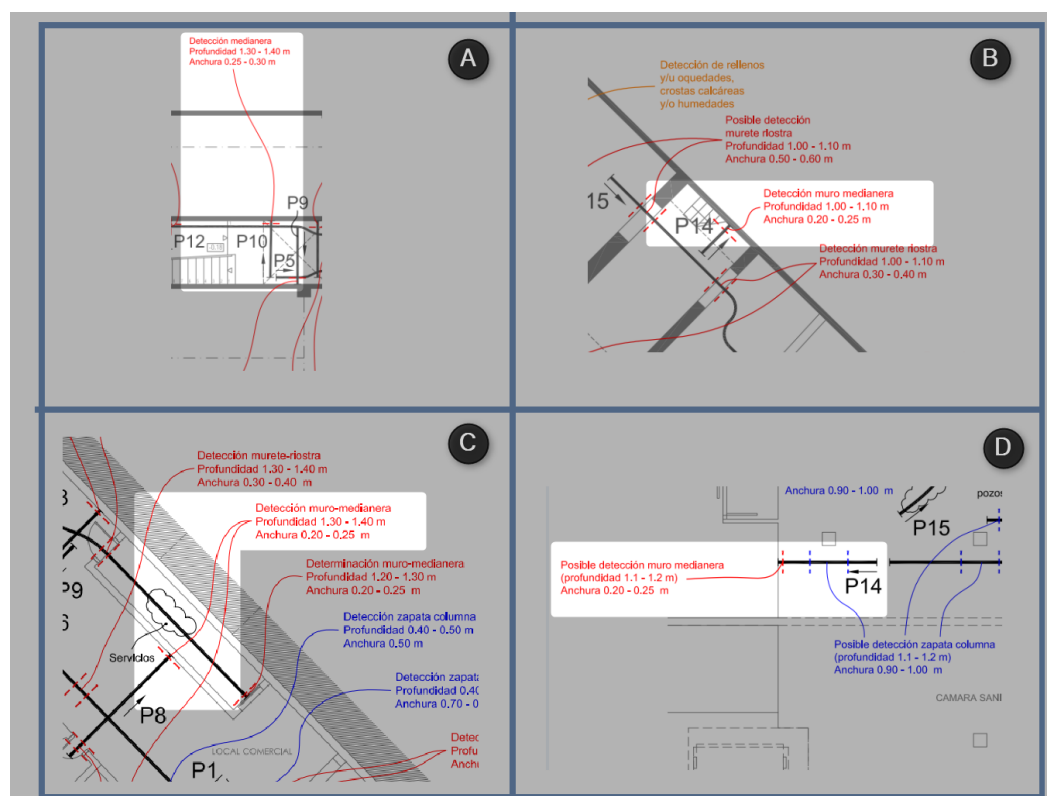
**Figura 4.9.** Esta figura se corresponde con la Figura 4.7 para cada perfil señalado en la figura anterior se muestra el radagrama correspondiente.



**Figura 4.8.** Radagrama que corresponde con el Perfil 2 del modelo a escala y situación espacial de la detección mostrada.

La profundidad mínima de cimentación encontrada de todos los casos presentados es de 0.40 metros en el edificio ubicado en la calle Tafalla en Pamplona y la máxima profundidad probable es de 1.50 metros en el edificio ubicado en la calle Aragón en Barcelona. Cabe destacar que los edificios de Cataluña tienen profundidades de cimentación similares, quizá porque en todos los casos las prospecciones se hicieron desde una planta baja, mientras que en Pamplona se llevaron a cabo las prospecciones desde la planta del sótano.

Otro caso que se pretende comparar es la detección de zapata medianera o excéntrica y muros de medianería. Suelen detectarse cuando el perfil llega de forma perpendicular al muro y por tanto casi siempre al final del radagrama o al principio (si se parte de un muro). Se encuentran en el interior de los edificios y presentan un ancho menor a un muro de carga. El Perfil 1 del modelo a escala (Figura 4.12) muestra esta situación, se tiene un ladrillo que simula la cimentación y sobresale muy poco (1 centímetro) en comparación con el ancho del ladrillo que simula la pared (3 centímetros). La Figura 4.10 muestra una porción del plano de los casos de estudio donde se detectó este tipo de estructura (sólo en 4 de los 6 casos) y la Figura 4.11 muestra los radagramas que corresponden con los perfiles mostrados en los planos.

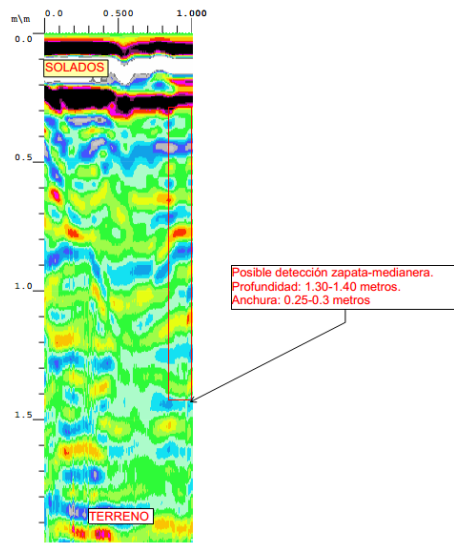


- A) Edificio en calle Nápoles, Barcelona
- B) Edificio en calle Marina, Barcelona
- C) Edificio en Gran Vía de les Corts Catalanes, Barcelona
- D) Edificio en calle Tafalla, Pamplona

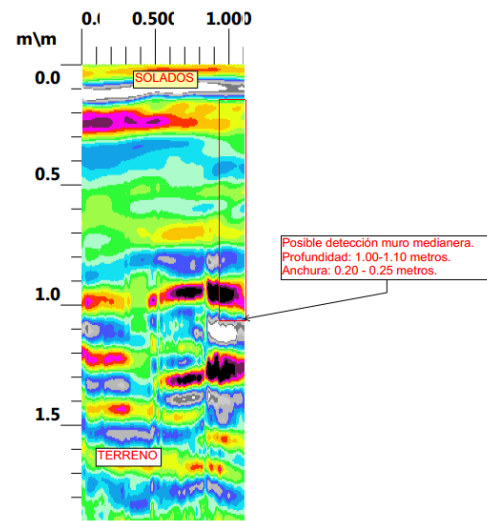
**Figura 4.10.** Porciones de los planos de edificios donde se han detectado medianeras.



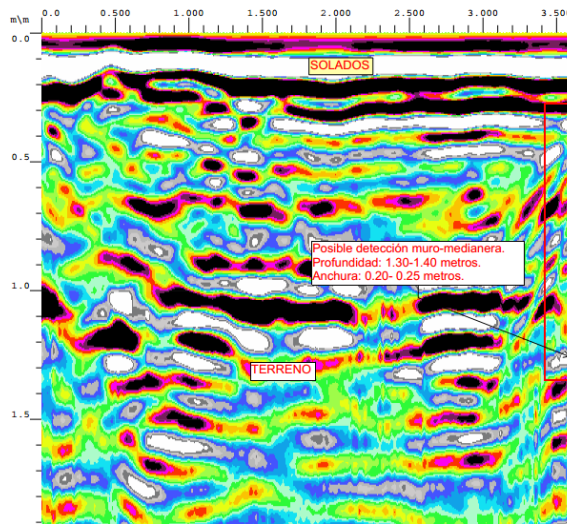
A) Edificio en calle Nápoles, Barcelona



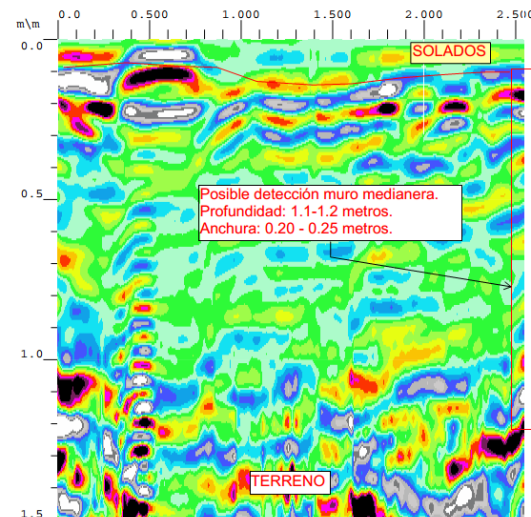
B) Edificio en calle Marina, Barcelona



C) Edificio en Gran Vía de les Corts Catalanes, Barcelona

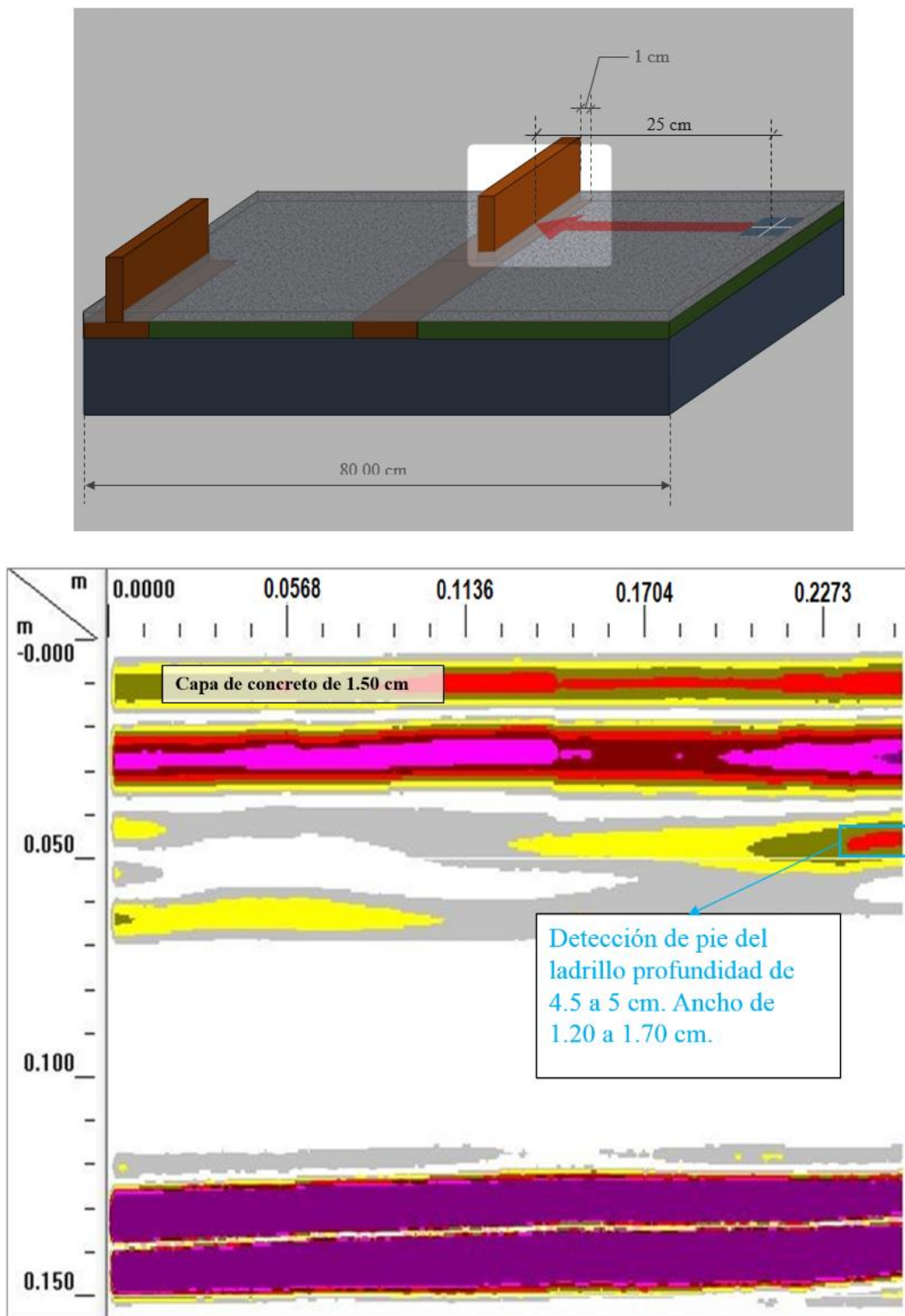


D) Edificio en calle Tafalla, Pamplona



**Figura 4.11.** Radagramas que se corresponden con los planos de la Figura 4.4. Se muestran las detecciones de medianeras en los casos donde existen.

En la Figura 4.12 se presenta el radagrama del Perfil 1 del modelo a escala y se resalta la zona que simula un muro de medianería. Se observa que todos los casos reales son muy similares a los mostrados en el radagrama del modelo a escala. Se nota la misma detección del pie de la cimentación a pesar de que el centro de la antena se encuentra alejada del muro, esta detección se logra por el ángulo de la antena.



**Figura 4.12.** Radagrama del Perfil 1 del modelo a escala (abajo). También se muestra la trayectoria del perfil y el lugar de la simulación de la zapata medianera (arriba).



## CONCLUSIONES

---

## CONCLUSIÓN

Como existen diversas empresas y sectores dedicados a la expansión del distrito del Eixample en Barcelona, esta tesis se ha enfocado en la historia de este distrito y su desarrollo. Sin embargo, existe interés en otros lugares del país por conocer la cimentación de edificios de mampostería, como Pamplona u otras localidades de Barcelona.

Se ha enfocado en el distrito del Eixample por ser el centro cultural y económico de la ciudad, además de que plantea el escenario ideal para que se produzcan el interés de conocer la cimentación de edificios antiguos. Cuando se dice antiguos se refiere a edificaciones de más de un siglo de antigüedad, donde no se tienen planos y por tanto no se conoce lo que hay en el subsuelo de estos edificios. Esta información es vital para la rehabilitación o recrecido de edificios, ya que si no se tienen los planos no se conoce la distribución de cargas a la cimentación.

Para entender un poco mejor los estudios de campo que se han presentado se dió un breve resumen de la teoría concerniente a la técnica de prospección con georradar. Durante esta exposición se planteó las ventajas de utilizar esta técnica para la exploración de edificios aunque existan obstáculos en el área de estudio (muros interiores). Puede verse la cimentación de estos muros medianeros o de carga aunque la antena se encuentre separada físicamente del objeto de estudio gracias a la característica del ángulo de radiación.

Se realizó un modelo a escala donde se representaron los casos más comunes que se encuentran en la exploración de edificaciones. Una vez obtenidos los resultados de este modelo se realizaron las prospecciones con georradar cuyos resultados se pensó podían ser útiles para comparar y calibrar los resultados de casos reales.

Se presentaron los casos reales de seis localizaciones, tres en el distrito del Eixample, una muy cerca de este distrito (separada por media cuadra), otra en el municipio de Gavá en Cataluña y otra en Pamplona. Se escogió esta variedad de localizaciones para mostrar la preferencia por el distrito en cuestión pero la no exclusividad. De estos edificios se mostraron los planos y los radagramas con los casos más importantes. Durante la exploración con georradar se encuentran, además de las cimentaciones, otros elementos que pueden ser de interés: la presencia de servicios enterrados, cambios de tipología constructiva, posible presencia de humedad o huecos.

Durante el proceso de comparación de los casos reales con los casos de estudio, se encontró la dificultad de tener mucha variación entre un caso y otro, con distintos elementos de cimentación, distintas profundidades o la presencia de perturbaciones en la geología que hace difícil de apreciar las prospecciones. A pesar de esto se escogieron los casos comunes y más representativos: muros medianeros (muros interiores que no son de carga o muros divisorios).

Los muros medianeros resultan interesantes por dos razones: se sabe de su condición (de carga o no) por la distancia que separa el muro del pie de la cimentación y como aprovechamos *el*

*ángulo de radiación de la antena* se puede observar la cimentación del muro aunque la antena se encuentre separada del mismo. Este caso de muro de medianería se encontró en cuatro de los seis casos de estudio, al ser comparado con el modelo a escala se obtuvieron resultados bastante parecidos (radagramas similares).

También se comparó el modelo a escala con los casos reales donde se detectó una riostra o muro de dintel, en estos casos el perfil del georradar pasa por una puerta y detecta el muro que se ha quedado debajo. En todos los casos de estudio se encontraron este tipo de muros y en algunos casos se puede notar más el parecido con el modelo a escala, en otros casos no resultó tan evidente y puede deberse a distintas razones: El relleno utilizado en el caso de estudio era más bien homogéneo (un solo tipo de suelo) y se encontraba seco, a diferencia de los variados tipos de suelo, geología y contenido de humedad que se encuentra en la realidad.

## **RECOMENDACIONES**

Realización de catas y calas para confirmar los resultados obtenidos con georradar en el caso de exploración de cimentaciones en edificios.

Los resultados obtenidos con georradar son un punto base o punto de partida para la intervención de una edificación. Se recomienda la realización de otros estudios que confirmen los resultados en los casos donde no se puedan realizar catas y calas.

Realizar modelos a escala más realistas en el futuro puede servir de herramienta para el análisis inverso de situaciones reales donde se tengan dudas.

## REFERENCIAS

- Barraca, N., Almeida, M., Varum, H., Almeida, F., & Senos Matias, M. (2016). A case study of the use of GPR for rehabilitation of a classified Art Deco building: The InovaDomus house. *Journal of Applied*, 1-13.
- Bonomo, N., & de la Vega, M. (2014). *El Método de Georadar*. Obtenido de Prospección Geofísica de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (Universidad de Buenos Aires): <https://goo.gl/gpfMu9>
- Cardama Aznar, Á., Jofre Roca, L., Rius Casals, J. M., Romeu Robert, J., Blanch Boris, S., & Ferrado Bataller, M. (1998). *Antenas* (Primera ed.). Barcelona: Edicions UPC.
- Cassidy, N. J. (2009). Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. En H. M. Jol (Ed.), *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (págs. 41-72). Amsterdam: Elsevier.
- Comorera, R. (29 de 11 de 2014). *El Eixample se eleva de nuevo con áticos en módulos prefabricados*. Recuperado el 5 de 2016, de <https://goo.gl/ZqreyP>
- Daniels, D. (2004). *Ground Penetrating Radar*. United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers.
- Economou, N., Vafidis, A., Benedet, F., & Alani, A. M. (2015). GPR Data Processing Techniques. En A. Benedetto, & L. Pajewski, *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar* (págs. 281-297). Springer.
- GeoService Perú. (s.f.). *GPS Geoservice Perú*. Recuperado el 25 de 08 de 2016, de <http://www.gspperu.com/pdf/georadar.pdf>
- González, F. E., & Marcello, F. J. (2002). *Fundamentos de Radar*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Guarnieri, M. (2010). The Early History of Radar. *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE*, Septiembre, 36-42.
- Hernández Arciniega, J. E. (2014). *Obtención de los parámetros dinámicos de la arcilla del llano de barcelona en probetas compactadas saturadas. Equipo de columna resonante*. Barcelona: Tesis de Máster de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Lantada Zarzosa, N. (2007). *Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS*. Barcelona: Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

- López Piñeiro, A., García Navarro, A., & Coll, M. (Diciembre 1998). Estimación de la profundidad de penetración del radar (GPR) a partir de medidas reflectométricas TDR "in situ". *EDAFOLÓGIA. Revista de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo*, 5, 109-120.
- Magrinyà Torner, F. (2009). El Ensanche de Barcelona y la modernidad de las teorías urbanísticas de Cerdà. *Ingeniería y Territorio*(88), 68-95.
- Manacorda, G., Persico, R., & Scott, H. F. (2015). Design of Advanced GPR Equipment for Civil Engineering Applications. En A. Benedetto, & L. Pajewski (Edits.), *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar* (págs. 3-39). Suiza: Springer.
- Moliner Vázquez, E. (2010). *Catalogación y levantamiento arquitectónico de fachadas de una isla del Ensanche (Aragó, Balmes, Consell de Cent y Enric Granados)RANADOS*. Barcelona: Proyecto Final de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. UPC.
- Monachesi, E., Frenzel, A. M., Chaile, G., Carrasco, A., & Gómez López, F. A. (2011). *Conceptos generales de antenas*. Tucumán, Argentina: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Montaner, J. M. (1987). Idelfons Cerdà y la Barcelona moderna. *Catalònia*(3), 44-45.
- Moreno-González, R., & Bairán, J. (2011). Análisis del comportamiento sísmico de los edificios de obra de fábrica, típicos del distrito Eixample de Barcelona. *Informes de la Construcción*, 63(524), 21-32.
- Nóvoa, M. (2009). Cerdà y el frente marítimo de Barcelona. *Ingeniería y Territorio*(88), 20-29.
- Pérez Gracia, M. d. (26 de 10 de 2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Obtenido de Tesis Doctorales en Red: <http://hdl.handle.net/10803/6216>
- Pérez-Gracia, V., Di Capua, D., González-Drigo, R., & Pujades, L. (2009). Laboratory characterization of a GPR antenna for high-resolution testing: Radiation pattern and vertical resolution. *NDT&E International*, 42, 336-344.
- Persico, R. (2014). *Introduction to Ground Penetrating Radar*. New Jersey: John Wiley Sons.
- Sarkar, T. K., & Salazar, M. (2014). A History of the Evolution of RADAR. *Proceedings of the 44th European Microwave Conference*, (págs. 734-737). Roma.
- Serratos, A. (2009). El hilo conductor de la dedicación de Cerdà a la mejora de la ocupación del territorio. *Ingeniería y territorio*(88), 4-7.
- Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. (2014). *Aplicación de técnicas de georradar para la contribución al conocimiento de la cimentación del edificio de la calle Tafalla, 18 de la ciudad de Pamplona*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.



Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. (2015). *Aplicación de técnicas de georradar para la contribución al conocimiento de la cimentación de dos sectores de la escuela Bon Soleil de Gava (Barcelona)*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. (2015). *Aplicación de técnicas de georradar para la contribución al conocimiento de la cimentación del edificio de la calle Aragón, 334 de Barcelona*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. (2015). *Aplicación de técnicas de georradar para la contribución al conocimiento de la cimentación del edificio de la calle Marina, 137 de Barcelona*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. (2016). *Aplicación de técnicas de georradar para la contribución al conocimiento de la cimentación del edificio de la calle Napols, 273 de Barcelona*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Servicio de Geofísica Aplicada de la UPC. (2016). *Aplicación de técnicas de georradar para la contribución al conocimiento de la cimentación del edificio de la Gran Vía de les Corts Catalanes, 504 de Barcelona*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Tobarra, S. (22 de Agosto de 2004). ¡Abajo las murallas! *EL PAÍS*.

Unión Internacional de Telecomunicaciones. (1959). *Reglamento de radiocomunicaciones*. Ginebra.

Vendrell Felici, S. (3 de enero de 2015). *La Casa por el Tejado*. Obtenido de Arquitectura y empresa: <https://goo.gl/718TQ9>

Warren, C., & Giannopoulos, A. (2016). Characterisation of a ground penetrating radar antenna in lossless homogeneous and lossy heterogeneous environments. *Signal Processing*.

Worksmart, Inc. (2012). *Worksmart, Inc. Advance Surface Imaging*. Recuperado el febrero de 2016, de <http://www.worksmartinc.net/>